

# **ESTUDO DE UMA OBRA DE PROTEÇÃO COSTEIRA DESTACADA PARA A FRENTE URBANA DO FURADOURO**

**JOANA AMÉLIA PIRES ALMEIDA E CASTRO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA**

---

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

JUNHO DE 2015

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais, à minha irmã

A ti, Pedro



## AGRADECIMENTOS

Expresso aqui o meu agradecimento a todos os que me acompanharam ao longo do meu percurso académico, contribuindo para a minha formação pessoal e académica.

Presto especial agradecimento ao meu orientador, o Professor Doutor Francisco Taveira Pinto, por todo o apoio prestado ao longo do desenvolvimento do trabalho, a constante disponibilidade e o incentivo para continuar, reconhecendo-lhe essencialmente o seu profissionalismo e objetividade.

Ao DHI Group, Portugal, em especial ao Engenheiro Ricardo Machado pela grande disponibilidade na assistência a todas as questões relacionadas com o *software* MIKE, pelo que sem a sua ajuda teria sido muito mais difícil a utilização deste programa.

Ao Engenheiro Pedro Poseiro do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, pelo auxílio no tratamento da informação referente aos dados geográficos utilizados, nomeadamente na utilização do *software* QGIS.

À APA, Agência Portuguesa do Ambiente, pela cedência dos dados referentes ao levantamento LiDAR 2011.

Ao Professor Doutor Paulo Santos pela ajuda na compreensão de alguns termos técnicos relacionados com o *software* MIKE.

À Camara Municipal de Ovar, em especial ao Eng. Manuel Jardim.

A todos os professores que me ajudaram a chegar até aqui, destacando o Professor Doutor Fernando Veloso Gomes por todos os conhecimentos transmitidos no âmbito da disciplina de Trabalhos Marítimos que motivaram a escolha desta dissertação.

Um obrigado a todos os meus colegas de Hidráulica, no qual se destacou a entreaajuda.

Por fim, um agradecimento à minha família, por sempre me terem apoiado na minha formação académica e essencialmente por todo o seu contributo na minha formação como pessoa, e ao Pedro, por todo o apoio e motivação sempre demonstrados.



## RESUMO

A praia do Furadouro, Ovar, pertence ao litoral da costa oeste portuguesa, onde são desenvolvidas importantes atividades económicas. No entanto, ao longo dos anos revelaram-se problemas de erosão e recuo da linha de costa, situação esta agravada pela intensa pressão urbana aí existente. Por ambas as razões, é necessário o estudo de soluções de proteção costeira de forma a mitigar estes problemas.

O trabalho realizado pretende, através da modelação numérica, contribuir para compreender a resposta da envolvente da praia do Furadouro à presença de estruturas de proteção costeira. Com a aplicação do *software* MIKE, foi efetuada a modelação da situação atual da praia e de duas soluções propostas de um e de dois quebramares destacados, considerando condições de agitação marítima médias e de temporal, tendo estas soluções como principais objetivos a mitigação da erosão da praia adjacente e a redução dos galgamentos da marginal.

Na presente dissertação, é feita inicialmente uma breve descrição das características, funcionamento e impactes dos quebramares destacados, seguindo-se uma exposição geral das funcionalidades do *software* utilizado. Posteriormente, é feita a caracterização da localidade e envolvente, assim como das soluções propostas e parâmetros influentes. Assim, foi possível a realização de várias simulações das situações já referidas que conduziram à obtenção de resultados que permitiram tirar conclusões e comparar as diversas soluções. São ainda propostos alguns desenvolvimentos que se possam fazer futuramente no seguimento deste trabalho.

Esta dissertação permitiu tecer conclusões tanto sobre a situação atual, assim como acerca das consequências aquando da concretização das soluções propostas, ainda que com a consciência das limitações da modelação numérica.

**PALAVRAS-CHAVE:** proteção costeira, quebramar destacado, Furadouro, modelação numérica, *software* MIKE.





## **ABSTRACT**

The Furadouro beach, Ovar, belongs to the Portuguese west coast, where important economic activities are developed. However, over the years erosion problems have been revealed, which got aggravated by intense urban pressure. For both reasons, the study of coastal protection solutions is necessary in order to mitigate those problems.

This work intends to use numerical modelling to understand the behaviour of Furadouro beach in the presence of coastal protection structures. With the application of MIKE software, the modelling of the current situation and two proposed solutions of one and two detached breakwaters were carried out, considering mean wave propagation condition, as well as storm condition, being the main goal the mitigation of erosion of the adjacent beach and the reduction of overtopping.

In this dissertation, initially a brief description of the characteristics, functioning and impacts of detached breakwater is made, followed by a general statement of the functionality of the software in use. Afterwards, the characterization of the location and surroundings, as well as the proposed solutions and influential parameters, are detailed. Thus, it was possible to perform various simulations of the situations mentioned above, which first led to results that allowed to draw conclusions and compare several solutions. Also, some future developments as a result of this work are proposed.

This dissertation made it possible to draw conclusions on the current situation and on the consequences of implementing the proposed solutions, even with the awareness of the limitations of numerical modelling.

**KEYWORDS:** coastal protection, detached breakwater, Furadouro, numerical modelling, MIKE software.



## ÍNDICE GERAL

Agradecimentos.....	i
Resumo .....	iii
Abstract .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. QUEBRAMARES DESTACADOS COMO OBRAS DE DEFESA COSTEIRA.....</b>	<b>3</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	3
2.2. OBRAS DE DEFESA COSTEIRA .....	4
2.3. QUEBRAMARES DESTACADOS .....	5
2.3.1. SECÇÃO TRANSVERSAL TIPO .....	5
2.3.2. MATERIAIS.....	5
2.3.3. PARÂMETROS FUNCIONAIS .....	6
2.3.4. AÇÕES PRINCIPAIS.....	8
2.3.5. FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO .....	9
2.3.6. IMPACTES.....	11
<b>3. Software MIKE.....</b>	<b>13</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	13
3.2. MIKE ZERO.....	14
3.2.1. INTRODUÇÃO .....	14
3.2.2. CRIAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL .....	14
3.2.3. PARÂMETROS DE ENTRADA.....	18
3.3. MIKE 21/3 INTEGRATED MODELS.....	19
3.3.1. INTRODUÇÃO .....	19
3.3.2. PARÂMETROS DE BASE.....	21
3.3.3. HYDRODYNAMIC MODULE.....	22
3.3.4. SPECTRAL WAVE MODULE .....	26
3.3.5. SAND TRANSPORT MODULE .....	29
<b>4. CASO DE ESTUDO – QUEBRAMAR DESTACADO PARA A FRENTE URBANA DO FURADOURO .....</b>	<b>33</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL .....	33

<b>4.2. CARACTERÍSTICAS DA OBRA EM ESTUDO .....</b>	<b>38</b>
4.2.1. QUEBRAMAR DESTACADO.....	38
4.2.2. AGITAÇÃO MARÍTIMA .....	39
4.2.3. SEDIMENTOS .....	43
4.2.4. BATIMETRIA .....	43
 <b>5. SIMULAÇÕES DO CASO DE ESTUDO .....</b>	 <b>47</b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	47
5.2. DADOS DE BASE PARA AS SIMULAÇÕES DO CASO DE ESTUDO .....	48
5.3. SIMULAÇÕES DO CASO DE ESTUDO .....	53
5.3.1. SIMULAÇÃO DA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	53
5.3.2. SIMULAÇÃO DA SITUAÇÃO DE UM QUEBRAMAR DESTACADO.....	69
5.3.3. SIMULAÇÃO DA SITUAÇÃO DE UM SISTEMA DE DOIS QUEBRAMARES DESTACADOS.....	82
5.3.4. SIMULAÇÃO DE UM EVENTO DE DUAS SEMANAS .....	94
 <b>6. CONCLUSÕES.....</b>	 <b>101</b>
6.1. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	101
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	102
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	 <b>105</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Quebramar destacado, Praia da Aguda, Arcozelo, Vila Nova de Gaia (adaptado de Google Earth™, 2015) .....	3
Fig.2.2 – Sistema de quebramares destacados, Praia do Janga, Janga, Paulista, Brasil (Google Earth™, 2015) .....	4
Fig.2.3 – Campo de esporões no Lobito, Benguela, Angola (Google Earth™, 2015) .....	4
Fig.2.4 – Perfil transversal tipo de um quebramar destacado (adaptado de Veloso Gomes, 2014b) .....	5
Fig.2.5 – Evolução gradual da deposição de sedimentos a sotamar de um quebramar destacado (Costa, 2009) .....	7
Fig.2.6 – Relação entre os rácios $d/L_0$ e $H/H_0$ (adaptado de Veloso Gomes, 2014c) .....	8
Fig.2.7 – Fenómeno de refração: (1) Concentração de energia (2) Dissipação de energia (adaptado de Veloso Gomes, 2014c) .....	9
Fig.2.8 – Fenómeno de difração (adaptado de <a href="http://www.coastalpractice.net/glossary/diffraction.htm">http://www.coastalpractice.net/glossary/diffraction.htm</a> ) .....	9
Fig.2.9 – Acumulação de sedimentos: saliência e tómbolo (adaptado de <a href="http://www.coastalwiki.org/wiki/detached_breakwaters">http://www.coastalwiki.org/wiki/detached_breakwaters</a> ) .....	10
Fig.3.1 – Fronteira Terra/Água num domínio que cobre o planeta Terra ( <a href="http://www.mikepoweredbydhi.com">http://www.mikepoweredbydhi.com</a> ) .....	15
Fig. 3.2 – Conceitos da ferramenta Mesh Generator ( <a href="http://www.mikepoweredbydhi.com">http://www.mikepoweredbydhi.com</a> ) .....	16
Fig. 3.3 – Malha gerada usando duas zonas com áreas máximas do elemento triangular diferentes (DHI Software, 2007) .....	17
Fig. 3.4 – Ficheiro da malha de um modelo que cobre o estreito de Oresund – batimetria (à esq.) e fronteiras fechada (1) e abertas (2,3) (à dir.) (MIKE by DHI, 2012) .....	18
Fig.3.5 – <i>Time Series Editor</i> com nível de água importado de Torsminde (MIKE by DHI, 2014) .....	18
Fig.3.6 – Janela do modelo de simulação utilizando o <i>MIKE 21/3 Coupled Model FM</i> .....	20
Fig. 3.7 – Nível médio da água de um modelo que cobre o porto de Copenhaga (MIKE by DHI, 2013a) .....	25
Fig. 3.8 – Altura de onda significativa no canal de Bristol ( <a href="http://www.mikepoweredbydhi.com">http://www.mikepoweredbydhi.com</a> ) .....	28
Fig. 3.9 – Alterações morfológicas num porto (MIKE by DHI, 2013b) .....	31
Fig. 3.10 – Detalhe do transporte de carga total na entrada de um porto (MIKE by DHI, 2013b) .....	31
Fig.4.1 – Praia do Furadouro (Piqueiro, 2015) .....	33
Fig.4.2 – Estrutura longitudinal aderente que se desenvolve para norte (2015) .....	34
Fig.4.3 – Esporão norte (2015) .....	34
Fig.4.4 – Esporão sul e estrutura longitudinal aderente entre esporões (Piqueiro, 2015) .....	35
Fig.4.5 – Estrutura longitudinal aderente sul (2015) .....	35

Fig.4.6 – Evolução cronológica da praia do Furadouro – Agosto de 2003, Maio de 2004, Outubro de 2006, Outubro de 2009, Julho de 2010, Junho de 2011, Julho de 2011, Junho de 2012 (da esquerda para a direita) (Google Earth™) .....	36
Fig.4.7 – Praia a norte do esporão norte do Furadouro em 2006 e indicação aproximada da arriba de erosão ocorrida em Março de 2010 (Velooso Gomes, 2010) .....	37
Fig.4.8 – Praia do Furadouro – zona entre esporões (Piqueiro, 2015).....	38
Fig.4.9 – Nível de água em Cascais de 22 de Março a 20 de Abril de 2015 .....	39
Fig.4.10 – Distribuição anual da direção do vento [%] ( <a href="http://pt.windfinder.com/forecast/furadouro">http://pt.windfinder.com/forecast/furadouro</a> ) ...	40
Fig.4.11 – Distribuição de frequência relativa (%) de HM0 (altura significativa) – Figueira da Foz (Costa et al., 2001).....	41
Fig.4.12 – Distribuição de frequência relativa (%) de TP (período de pico) – Figueira da Foz (Costa et al., 2001) .....	41
Fig.4.13 – Distribuição de frequência relativa (%) de THTP (direção média) – Figueira da Foz (Costa et al., 2001) .....	41
Fig.4.14 – Distribuição conjunta Hmax-orientação – Figueira da Foz (Costa et al., 2001).....	42
Fig.4.15 – Distribuição conjunta média de THTP-duração – Figueira da Foz (Costa et al., 2001).....	42
Fig.4.16 – Levantamento LiDAR 2011 - praia do Furadouro (APA, 2011).....	44
Fig.4.17 – Batimetria modificada, que se admite que seja a mais próxima da realidade no ano de 2011 (Ramos, 2011).....	45
Fig.5.1 – Fronteira do modelo .....	48
Fig.5.2 – Fronteira e malha do modelo para a situação de referência.....	49
Fig.5.3 – Fronteira e malha do modelo para a situação de um quebramar destacado .....	50
Fig.5.4 – Fronteira e malha do modelo para a situação de dois quebramares destacados .....	50
Fig.5.5 – Batimetria usada do modelo numérico.....	51
Fig.5.6 – Série temporal dos níveis de água, em relação ao Z.T.....	51
Fig.5.7 – Nível médio da água, em relação ao Z.T. ( $H_s=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	54
Fig.5.8 – Velocidade da corrente e respetivos vetores ( $H_s=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	55
Fig.5.9 – Altura de onda significativa e vetores representativos da direção da onda ( $H_s=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	56
Fig.5.10 – Altura de onda máxima ( $H_s=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	57
Fig.5.11 – Período da onda de pico ( $H_s=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	58
Fig.5.12 – Direção média da onda ( $H_s=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	59
Fig.5.13 – Potência da onda ( $H_s=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	60
Fig.5.14 – Caudal sólido transportado ( $H_s=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	61
Fig.5.15 – Taxa de alteração do nível dos fundos ( $H_s=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	62
Fig.5.16 – Nível médio da água, ao Z.T. ( $H_s=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	63

Fig.5.17 – Velocidade da corrente e respetivos vetores ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste).....	64
Fig.5.18 – Altura de onda significativa e vetores representativos da direção da onda ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	65
Fig.5.19 – Altura de onda máxima ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	65
Fig.5.20 – Período da onda de pico ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	66
Fig.5.21 – Direção média da onda ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	67
Fig.5.22 – Potência da onda ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	68
Fig.5.23 – Caudal sólido transportado ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	69
Fig.5.24 – Taxa de alteração do nível dos fundos ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	69
Fig.5.25 – Nível médio da água, ao Z.T. ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste).....	71
Fig.5.26 – Velocidade da corrente e respetivos vetores ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste).....	72
Fig.5.27 – Altura de onda significativa e vetores representativos da direção de onda ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste).....	73
Fig.5.28 – Altura de onda máxima ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	73
Fig.5.29 – Período da onda de pico ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	74
Fig.5.30 – Direção média de onda ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	74
Fig.5.31 – Potência da onda ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	75
Fig.5.32 – Caudal sólido transportado ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	76
Fig.5.33 – Taxa de alteração do nível dos fundos ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	76
Fig.5.34 – Nível médio da água, ao Z.T. ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste).....	77
Fig.5.35 – Velocidade da corrente e respetivos vetores ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste).....	78
Fig.5.36 – Altura de onda significativa e vetores representativos da direção de onda ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	79
Fig.5.37 – Altura de onda máxima ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	79
Fig.5.38 – Período da onda de pico ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	80
Fig.5.39 – Direção média de onda ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	80
Fig.5.40 – Potência da onda ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	81
Fig.5.41 – Caudal sólido transportado ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	82
Fig.5.42 – Taxa de alteração do nível dos fundos ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	82
Fig.5.43 – Nível médio da água, ao Z.T. ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste).....	83
Fig.5.44 – Velocidade da corrente e respetivos vetores ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste).....	84
Fig.5.45 – Altura de onda significativa e vetores representativos da direção de onda ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste).....	85
Fig.5.46 – Altura de onda máxima ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	85
Fig.5.47 – Período da onda de pico ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	86

Fig.5.48 – Direção média da onda ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	86
Fig.5.49 – Potência da onda ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	87
Fig.5.50 – Caudal sólido transportado ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	88
Fig.5.51 – Taxa de alteração do nível dos fundos ( $H_S=2.2m$ ; $T_P=11.4s$ ; Noroeste) .....	88
Fig.5.52 – Nível médio da água, ao Z.T. ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	89
Fig.5.53 – Velocidades da corrente e respetivos vetores ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	90
Fig.5.54 – Altura de onda significativa e vetores representativos da direção de onda ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste).....	91
Fig.5.55 – Altura de onda máxima ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	91
Fig.5.56 – Período da onda de pico ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	92
Fig.5.57 – Direção média da onda ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	92
Fig.5.58 – Potência da onda ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	93
Fig.5.59 – Caudal sólido transportado ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	94
Fig.5.60 – Taxa de alteração do nível dos fundos ( $H_S=6m$ ; $T_P=14s$ ; Oeste) .....	94
Fig.5.61 – Alteração das cotas dos fundos (situação de referência) .....	95
Fig.5.62 – Cota dos fundos inicial (à esq.) e após duas semanas (à dir.), ao Z.T.....	96
Fig.5.63 – Alteração da cota dos fundos (situação de um quebramar destacado).....	97
Fig.5.64 – Cota dos fundos inicial (à esq.) e após duas semanas (à dir.), ao Z.T.....	98
Fig.5.65 – Alterações das cotas dos fundos (situação com dois quebramares destacados) .....	98
Fig.5.66 – Cota dos fundos inicial (à esq.) e após duas semanas (à dir.), ao Z.T.....	99



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 – Variação mensal da direção e velocidade média do vento ( <a href="http://pt.windfinder.com/forecast/furadouro">http://pt.windfinder.com/forecast/furadouro</a> ) .....	40
Quadro 4.2 – Condições de agitação.....	43
Quadro 5.1 – Opções da malha triangular .....	49
Quadro 5.2 – Parâmetros considerados no <i>Hydrodynamic Module</i> .....	52
Quadro 5.3 – Parâmetros considerados no <i>Spectral Wave Module</i> .....	53
Quadro 5.4 – Parâmetros considerados no <i>Sand Transport Module</i> .....	53



## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

CFL – Courant-Friedrich-Lévy

DHI – *Danish Hydraulic Institute*

FM – *Flexible Mesh*

HD – *Hydrodynamic Module*

JMC – *Japanese Ministry of Construction*

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

N – Norte

NNO – Nor-noroeste

RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes

S – Sul

SW – *Spectral Wave Module*

ST – *Sand Transport Module*

Z.T. – Zero Topográfico

Z.H. – Zero Hidrográfico

$\nabla$  - densidade de energia

$\sigma$  – frequência angular

d – profundidade [m]

H – altura de onda [m]

$H_0$  – altura de onda ao largo [m]

$HM_0$  – altura de onda significativa [m]

$H_{max}$  – altura de onda máxima [m]

$H_s$  – altura de onda significativa [m]

L – comprimento de onda [m]

$L_0$  – comprimento de onda ao largo [m]

N – densidade de ação

$R_c$  – grau de submergência

S – termo fonte

THTP – direção média

TP – período de pico [s]

$T_P$  – período de pico [s]

$t$  – tempo

$v$  – velocidade do grupo

# 1

## INTRODUÇÃO

Nas zonas costeiras e no litoral são desenvolvidas importantes atividades económicas, nomeadamente: construção, turismo, transportes marítimos, pesca, aquacultura e desportos, e por essa razão são zonas que atraem a atenção pública.

As zonas costeiras são, pela sua natureza, zonas dinâmicas e, por isso, as praias e dunas tendem a mudar as suas características ao longo dos anos. Contudo, a fixação de edifícios e infraestruturas junto ou sobre estas zonas entra em conflito com essa dinâmica natural (Veloso Gomes, 2014a).

Ao longo das últimas décadas, tem-se verificado que as praias portuguesas têm perdido dimensão. As principais causas da situação generalizada do recuo da linha de costa são: ocupação humana, alterações ao nível das bacias hidrográficas, albufeiras e barragens, extração de areias em rios e estuários, dragagens nos canais de navegação, construção de quebra-mares portuários e canais de navegação, implantação de esporões, obras aderentes e quebra-mares destacados com consequências a sotamar e destruição e fragilização de dunas (Veloso Gomes, 2010).

De forma a mitigar estas situações são, por vezes, implantadas diversas soluções de proteção costeira, que necessitam impreterivelmente de manutenção para continuarem a ter o efeito desejado.

No caso particular da localidade do Furadouro, em Ovar, existem acentuados problemas de erosão, situação esta agravada pela intensa pressão urbana. Quase todos os anos, aquando da ocorrência de temporais, ocorrem galgamentos sobre as estruturas, provocando, muitas vezes, danos materiais na marginal e o recuo da linha de costa. Assim, a construção e/ou manutenção de obras de defesa costeira neste local representa uma necessidade.

O presente relatório corresponde à dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, ramo de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, ministrado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no ano letivo de 2014/15, sob orientação do Professor Doutor Francisco Taveira Pinto.

O objetivo desta dissertação visa o estudo de uma obra de proteção costeira destacada para um caso de estudo específico - frente urbana do Furadouro, Ovar. Este estudo foi feito com recurso à modelação numérica, utilizando o *software* MIKE, que permite a realização de várias simulações de modo a compreender melhor os fenómenos que se originam. Este *software* foi desenvolvido pelo DHI (*Danish Hydraulic Institute*) e tem diversas aplicações nos ramos da hidráulica, sendo aplicados, no presente trabalho, os módulos que compõem o *MIKE 21/3 Integrated Models*, no âmbito das áreas científicas costeira e marítima. Este *software*, marcado por uma índole bastante prática e com uma interface simples e clara, é aplicado pela primeira vez no âmbito de uma dissertação na presente Faculdade.

A dissertação encontra-se subdividida em 6 capítulos. No seguimento deste primeiro capítulo introdutório, é apresentado o capítulo 2, intitulado *Quebramares Destacados como Obras de Defesa Costeira*, onde é feita uma breve descrição destas estruturas, especificando aspetos como a constituição, os parâmetros funcionais, as ações a que estão expostas, o funcionamento hidráulico e os consequentes impactes.

No capítulo 3, *Software MIKE*, é feita uma descrição deste programa computacional, salientando as suas potencialidades e desenvolvendo os vários módulos aplicados no presente trabalho.

O capítulo 4, *Caso de Estudo – Frente Urbana do Furadouro*, faz uma caracterização geral da localidade em estudo e da zona envolvente, descrevendo as estruturas já existentes e a evolução da linha de costa, e aponta algumas características da obra em estudo, nomeadamente no que se refere ao quebramar destacado, à agitação marítima, aos sedimentos e à batimetria.

No capítulo 5, *Simulações do Caso de Estudo*, são apresentadas as simulações executadas, começando pela situação de referência e, de seguida, são propostas duas soluções de obras de proteção costeira destacada, onde se faz a descrição de vários parâmetros de análise. Finalmente, é feita a simulação de um evento com a duração de duas semanas com o objetivo de conhecer as alterações dos fundos nesse horizonte temporal.

Por último, no capítulo 6, *Conclusões*, é realizada uma síntese dos resultados obtidos no capítulo anterior e uma comparação entre estes. Para além disso, são propostos possíveis desenvolvimentos futuros do presente trabalho.

## 2

### **QUEBRAMARES DESTACADOS COMO OBRAS DE DEFESA COSTEIRA**

#### **2.1. INTRODUÇÃO**

Na costa portuguesa, tem-se vindo a observar ao longo do tempo um recuo acentuado da linha de costa. De modo a contrariar este fenómeno, têm surgido várias soluções no que respeita a obras de defesa costeira, nomeadamente os quebramares destacados, que desempenham um papel importante na estabilização dos processos de transporte de sedimentos e na proteção da costa. Nas figuras 2.1 e 2.2, apresentam-se, respetivamente, um exemplo de um quebramar destacado existente em Portugal, onde se verifica um grande nível de assoreamento provocado pelo mesmo, e um exemplo de um sistema de vários quebramares destacados, onde se pode observar dois tipos de acumulação de sedimentos a sotamar: saliência e tómbolo.

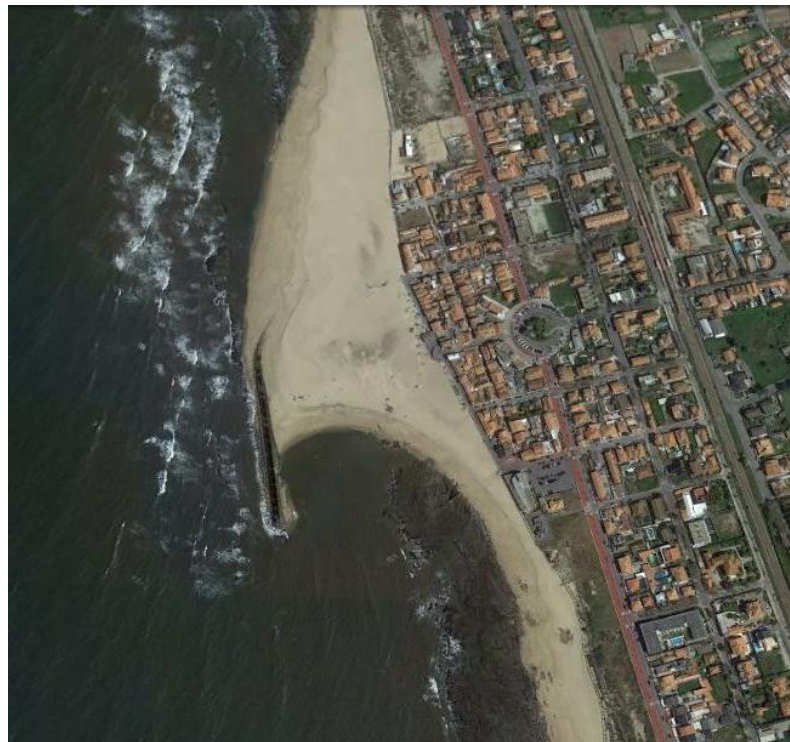


Fig.2.1 – Quebramar destacado, Praia da Aguda, Arcozelo, Vila Nova de Gaia (adaptado de Google Earth™, 2015)

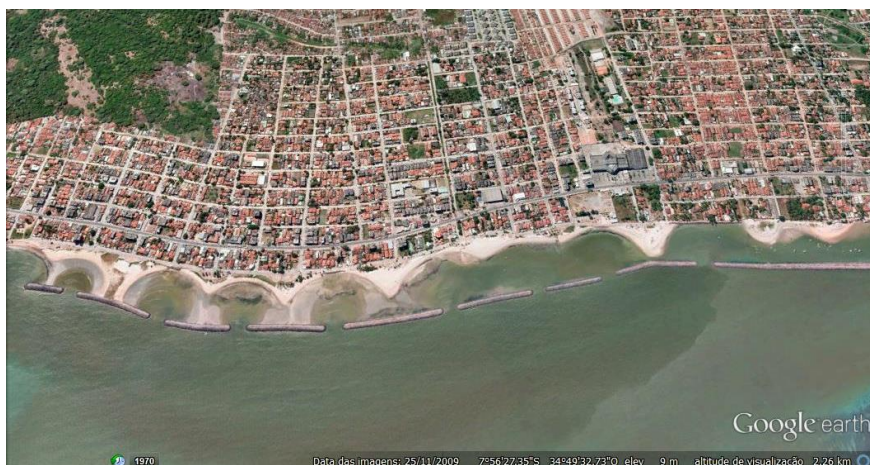


Fig.2.2 – Sistema de quebramares destacados, Praia do Janga, Janga, Paulista, Brasil (Google Earth™, 2015)

## 2.2. OBRAS DE DEFESA COSTEIRA

As zonas costeiras estão associadas, geralmente, a atividades humanas de grande valor económico, pelo que há um grande interesse em garantir a estabilidade e o crescimento sustentável destas zonas. Daí a importância das obras de defesa costeira, cujos objetivos principais assentam na proteção e recuperação de sistemas naturais, como arribas, dunas e praias, e na proteção de bens e frentes urbanas.

Existem diferentes tipos de obras de defesa costeira, nomeadamente estruturas transversais, estruturas longitudinais, aderentes e destacadas, de proteção e reforço de dunas, alimentação artificial de praias, transposição *by-passing* e soluções mistas, com o intuito de resolver problemas relacionados com a erosão costeira, controlando ou apenas adiando o recuo da linha de costa. Estes problemas são causados por processos naturais, no entanto têm vindo a ser agravados pela intervenção humana, tendo grande impacto a nível ambiental, económico e social. Na Fig.2.3, expõe-se um exemplo de um vasto campo de esporões e o efeito consequente na linha de costa.

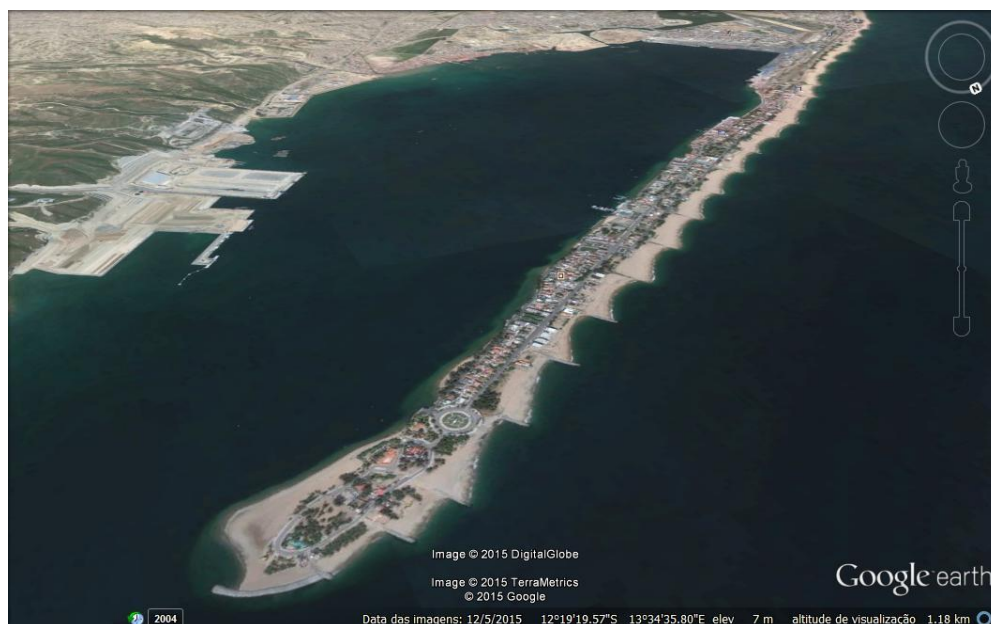


Fig.2.3 – Campo de esporões no Lobito, Benguela, Angola (Google Earth™, 2015)



## 2.3. QUEBRAMARES DESTACADOS

### 2.3.1. SECÇÃO TRANSVERSAL TIPO

A secção transversal de um quebramar destacado é, em geral, muito semelhante à de um quebramar de taludes. De forma aproximadamente trapezoidal, o perfil transversal tipo, representado na Fig.2.4, é constituído pelos seguintes elementos principais:

- Manto resistente;
- Manto intermédio;
- Filtro;
- Núcleo;
- Risberma.

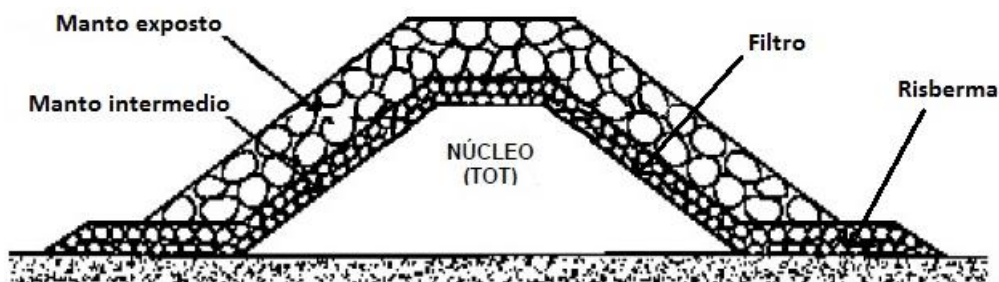


Fig.2.4 – Perfil transversal tipo de um quebramar destacado (adaptado de Veloso Gomes, 2014b)

O manto resistente corresponde à camada exposta sobre o qual se dá a ação direta da agitação marítima, provocando a pretendida dissipação de energia da mesma. Essa dissipação é conseguida por rebentação da onda, por atrito, pela formação de uma emulsão ar-água, por reflexão da onda e por dissipação nas camadas inferiores. O manto é composto, geralmente, por duas fiadas de blocos naturais ou artificiais.

Relativamente ao manto intermédio, este é constituído habitualmente por blocos naturais, tendo como função estabelecer a transição entre o núcleo e o manto resistente e evitar a saída de finos do núcleo. Usualmente, para um melhor cumprimento dessas funções, o manto é composto por várias camadas, cujo diâmetro dos blocos é decrescente em direção ao núcleo.

De apoio ao manto intermédio, poderá ser usado um filtro artificial para evitar a saída de finos do núcleo. Por sua vez, o núcleo corresponde à zona de enchimento do quebramar, situando-se no interior deste.

A risberma corresponde a um prisma de enrocamento localizado na base do manto resistente, podendo funcionar como fundação do mesmo e assim evitar infraescavações.

### 2.3.2. MATERIAIS

O tipo de obra em questão, devido ao ambiente onde está inserido e às ações a que está sujeito, exige materiais de grande resistência e durabilidade, sendo por isso o enrocamento e o betão os mais usuais.

No manto resistente, que exige elevada resistência devido à sua grande exposição, aplicam-se geralmente blocos de enrocamento ou blocos de betão. O desejável seria utilizar blocos naturais, de enrocamento, pois são normalmente mais baratos, de maior durabilidade e podem ser de elevada resistência, ou seja, são mais vantajosos que os blocos de betão. Para além disso, o uso de

enrocamento traduz-se em menores impactes ambientais, nomeadamente no que diz respeito ao impacto visual e ao impacto sobre a fauna e a flora, sendo que, mais tarde, caso seja aplicado enrocamento, o quebramar poderá apresentar um aspeto visual mais natural, principalmente se o enrocamento for característico da zona, e criar condições para a fixação de espécies nos seus taludes.

No entanto, nem sempre é possível a sua utilização. Se nas proximidades do local de implantação da obra em questão não existirem blocos de enrocamento ou existirem mas não com a resistência e tamanho pretendidos, esta solução deixa de ser uma opção. Como estes blocos são geralmente de grande dimensão, seria impossível fazer o transporte destes nas estradas comuns. Para além disso, ainda que fosse possível, o custo associado seria muito elevado.

Posto isto, é possível justificar a habitual utilização de blocos de betão no manto exposto de quebramares destacados.

No caso do manto intermédio, camada não exposta, os blocos aplicados são de menores dimensões, logo, neste caso, o uso de blocos de enrocamento já é viável e, normalmente, a melhor solução. Também na risberma, é usado enrocamento, cujas dimensões poderão ser ou não as mesmas aplicadas no manto intermédio. No que se refere ao núcleo, este é composto por material de granulometria variada (T.O.T.).

No caso de ser aplicado um filtro artificial, o material usado é um geossintético, geralmente um geotêxtil.

### 2.3.3. PARÂMETROS FUNCIONAIS

A definição dos parâmetros estruturais de um quebramar destacado é essencial para a sua conceção. Para isso, o conhecimento das características físicas do local é determinante aquando da escolha desses mesmos parâmetros a adotar. As principais características físicas locais a considerar são as seguintes:

- Batimetria;
- Cotas de fundação;
- Características sedimentares: direção dominante do transporte de sedimentos e características dos sedimentos;
- Direção e intensidade dos ventos dominantes;
- Alturas, períodos e direções de onda;
- Amplitude de maré.

Através de levantamentos topo-hidrográficos ou boias ondógrafo é possível determinar alguns destes parâmetros, sendo necessário muitas vezes o processamento dos dados obtidos. De referir que as medições realizadas no local devem ser rigorosas e atualizadas e que as estimativas feitas com base no processamento dos dados, para que sejam credíveis, devem ter como base dados históricos, cujos registos foram feitos com o rigor adequado e abrangendo vários anos, com uma duração tal que daí possam ser tiradas conclusões.

Os parâmetros funcionais do quebramar destacado a adotar, relacionados impreterivelmente com as características acima especificadas, são os seguintes:

- Comprimento longitudinal;
- Distância e alinhamento em relação à linha de costa;
- Afastamento entre quebramares, caso se trate de um campo de quebramares;
- Cota do coroamento;

- Largura do coroamento;
- Ângulo dos taludes;
- Cota de fundação.

Os parâmetros mencionados influenciam alguns fatores, como a forma da linha de costa e o grau de submergência, que são determinantes para o funcionamento do quebramar, de modo a cumprir da melhor forma o objetivo a que este se destina.

Após a construção do quebramar destacado, a forma da linha de costa altera-se de modo distinto consoante as características do quebramar, nomeadamente a distância e o alinhamento em relação à linha de costa e o seu comprimento longitudinal. Na Fig.2.5, é possível observar a evolução gradual da deposição de sedimentos, ou seja, a alteração da linha de costa a sotamar de um quebramar destacado.

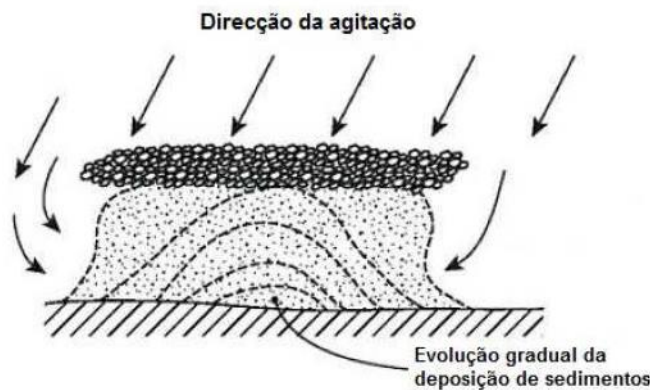


Fig.2.5 – Evolução gradual da deposição de sedimentos a sotamar de um quebramar destacado (Costa, 2009)

O grau de submergência da estrutura ( $R_c$ ), diferença entre a altura do quebramar e o nível máximo de preia-mar de águas vivas, indica se a estrutura está imersa ( $R_c < 0$ ) ou emersa ( $R_c > 0$ ). Este grau, que depende da cota de coroamento adotada, influencia, por sua vez, o coeficiente de transmissão da agitação através ou sobre a estrutura.

A avaliação do coeficiente de transmissão pode implicar o aumento da cota do coroamento e, consequentemente, a redução de galgamentos. Este coeficiente depende, também, do grau de permeabilidade da estrutura.

Em suma, a análise destes dois parâmetros, interligados entre si, grau de submergência e coeficiente de transmissão, permite concluir se há uma maior ou menor dissipação de energia, possibilitando assim o ajuste da cota de coroamento do quebramar destacado consoante o efeito pretendido.

A opção por quebramares emersos acontece em zonas com condições de agitação muito energéticas, pois nestes a capacidade de redução da energia a sotamar da obra é maior. Contrariamente, em zonas de condições de agitação pouco energéticas opta-se, geralmente, por quebramares imersos. Esta última opção é favorável no que diz respeito a possíveis problemas com a estagnação das águas e a impactes paisagísticos.

#### 2.3.4. AÇÕES PRINCIPAIS

Para o projeto de qualquer obra de engenharia civil, é imprescindível o conhecimento das ações exercidas sobre a estrutura correspondente. A obra marítima em estudo não é exceção, tornando-se necessário o conhecimento das ações exercidas sobre ela. As ações principais a ter em conta no dimensionamento do quebramar são as marés, as correntes e a agitação marítima.

A ação exercida pelas marés está relacionada com o facto de haver uma variação do nível médio da água, sendo que esta ação é de maior importância quanto maior for esse desnível. Esta ação representa uma variação das ações exercidas sobre o manto resistente que altera, assim, as condições de interação, tendo maior influência em situações de rutura.

Em relação à ação provocada pelas correntes de maré, esta é de maior importância no que diz respeito a infraescavações em fundos móveis, caso as velocidades dessas correntes sejam significativas. Esta ação é pouco relevante no que se refere à estabilidade dos blocos do manto resistente. Para além destas, também as ondas podem gerar correntes longitudinais e transversais à costa. As correntes de maré e devidas às ondas são responsáveis pelo transporte de sedimentos e podem representar um fator de risco para os banhistas.

Na costa portuguesa, as ações provocadas pela agitação marítima são as mais importantes, pois são as mais agressivas. Fenómenos como rebentação e galgamento justificam esta afirmação. Estas ações provocam esforços internos e oscilações com ou sem choques entre os blocos, variação da pressão hidrostática nas camadas inferiores e rutura, queda ou deslocamento dos blocos.

No estudo de quebramares destacados, é essencial ter em conta diferentes fenómenos de interação com fronteiras sólidas, entre eles: empolamento, rebentação, refração, difração e galgamento.

À medida que a agitação se aproxima da costa com profundidades ( $d$ ) sucessivamente menores, a altura da onda ( $H$ ) altera-se ( $H_0$ ), até que num certo momento se dá o empolamento da onda, em que  $H/H_0 > 1$ , e posteriormente a rebentação desta. A Fig.2.6 mostra a evolução da onda desde o largo até à costa, a partir da relação  $d/L_0 - H/H_0$ .

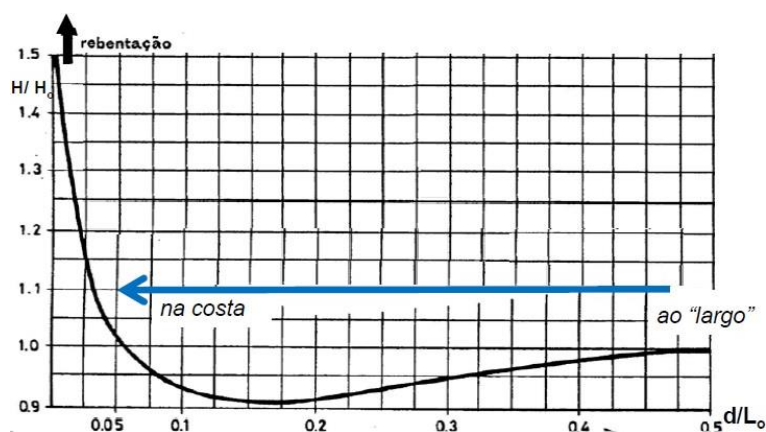


Fig.2.6 – Relação entre os rácios  $d/L_0$  e  $H/H_0$  (adaptado de Veloso Gomes, 2014c)

Os fenómenos de refração surgem quando, devido à irregularidade dos fundos, as cristas das ondas se deformam ao aproximarem-se da linha de costa e tendem a ficar paralelas às batimétricas. Na Fig.2.7, é possível observar este fenómeno, assim como as zonas de maior ou menor concentração de energia associadas.

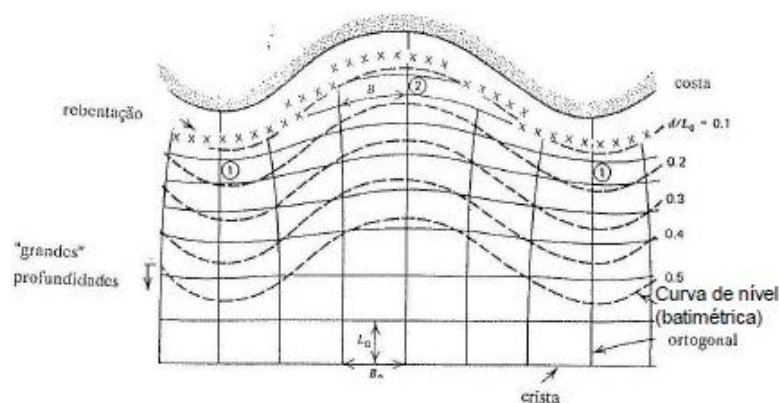


Fig.2.7 – Fenómeno de refração: (1) Concentração de energia (2) Dissipação de energia (adaptado de Veloso Gomes, 2014c)

Uma transferência lateral de energia ao longo da crista da onda quando esta é interrompida por um obstáculo está associada ao fenómeno de difração das ondas, fenómeno este de grande importância no estudo de quebramares destacados, ilustrado na Fig.2.8.

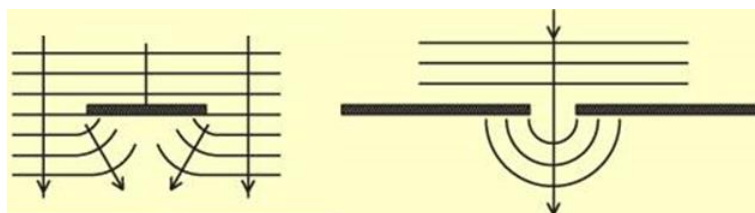


Fig.2.8 – Fenómeno de difração (adaptado de <http://www.coastalpractice.net/glossary/diffraction.htm>)

Frequentemente determinante na definição das cotas de coroamento das estruturas costeiras, o fenómeno de galgamento ocorre quando a cota de máximo espraio excede a cota do coroamento da estrutura.

### 2.3.5. FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO

O objetivo de um quebramar destacado é reduzir a energia da agitação incidente sobre a linha de costa adjacente. Este tipo de obra de proteção costeira é, geralmente, implantado em zonas balneares de interesse turístico. Assim, a melhoria das condições balneares dessa zona poderá traduzir-se num aumento desse interesse e, conseqüentemente, num aumento do capital da localidade onde se insere.

A construção da estrutura melhora o grau de defesa contra a ação do mar e possibilita o aumento da área balnear, assim como do perímetro de praia em contacto com o mar, pois altera o transporte sedimentar. Desta forma, o interesse acima referido poderá ser alcançado.

O quebramar destacado comporta-se como uma barreira à normal propagação da onda em direção à costa, reduzindo, assim, a energia de agitação a sotamar da estrutura, região na qual se deve ter especial atenção relativamente à possível estagnação das águas, garantindo a sua renovação.

A dissipação de energia, associada a fenómenos de difração, refração e outros, proporciona o transporte e acumulação de sedimentos, levando ao reajustamento dos fundos. No caso de um quebramar imerso, ocorre rebentação da onda e há transporte de sedimentos sobre a estrutura.

O fenómeno de difração impossibilita a eliminação total da agitação na zona abrigada, sendo que a redução das alturas de onda será proporcional às dimensões da estrutura adotadas. As correntes de difração geram-se nas extremidades do quebramar e propagam-se até à linha de costa, promovendo o referido reajustamento dos sedimentos.

Os quebramares destacados proporcionam uma redistribuição do padrão de transporte de sedimentos, de modo a criar a configuração de praia desejada (Taveira Pinto, 2007). Para que se alcance essa configuração, é essencial o correto dimensionamento da estrutura. A acumulação de sedimentos depende das condições locais e das características do quebramar, podendo ser de dois tipos, exemplificados na Fig.2.9:

- Saliência - banco de areia com origem na linha de costa original, de onde parte um prolongamento do mesmo, não atingindo o quebramar destacado.
- Tômbolo - saliência de sedimentos, na zona abrigada, que se prolonga desde a linha de costa até ao quebramar destacado, caracterizando-se por uma grande área de acumulação de areia, embora, nem sempre benéfica, pois pode interromper o transporte longitudinal de sedimentos para as praias vizinhas.

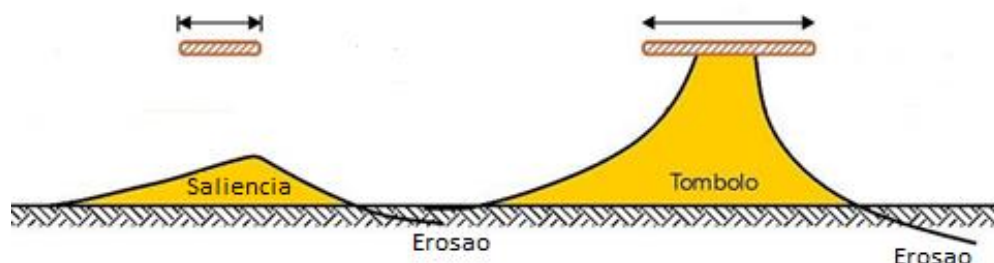


Fig.2.9 – Acumulação de sedimentos: saliência e tômbolo (adaptado de [http://www.coastalwiki.org/wiki/detached\\_breakwaters](http://www.coastalwiki.org/wiki/detached_breakwaters))

A maior ou menor tendência para a retenção de sedimentos pode estar relacionada com a distância da estrutura à linha de costa, a declividade da onda ( $H/L$ ), a cota de coroamento acima do nível médio da água e o comprimento do quebramar, variáveis estas que influenciam a resposta da linha de costa à construção do quebramar.

O dimensionamento hidráulico do quebramar, que passa pela definição de diversos parâmetros já referidos em 2.3.3., está relacionado também com o dimensionamento estrutural desse mesmo quebramar, sendo que as suas variáveis (peso unitário dos blocos do manto resistente; cotas do coroamento e fundação; largura do coroamento; inclinação dos taludes) devem ser incluídas no dimensionamento hidráulico para definição desses mesmos parâmetros.

Para a concretização do dimensionamento hidráulico de quebramares destacados têm sido desenvolvidos vários estudos com recurso a métodos empíricos e a modelos físicos, nomeadamente no que respeita à avaliação da transmissão da agitação por galgamento e/ou através da estrutura e das alterações morfológicas a sotamar da estrutura.

O coeficiente de transmissão é um dos parâmetros que tem sido objeto de estudo, sendo que a sua análise foi realizada por vários autores, dos quais Van der Meer e Daemen (1994), Ahrens (2001), Taveira Pinto (2001) e Briganti et al. (2003), que com base em medições em laboratório e em campo apresentaram inúmeras relações empíricas.

Para o estudo das alterações morfológicas existem vários modelos empíricos cujas expressões empíricas foram desenvolvidas por diversos autores como Hanson e Kraus (1989, 1990), Harris e Herbich (1986), Dally e Pope (1986), Ming e Chiew (2000), (1987), Gourlay (1981) e Black e Andrews (2001).

No âmbito de um estudo de quebramares destacados construídos no Japão, foi também desenvolvido pelo Ministério Japonês da Construção (JMC), em 1986, um método que se processa de modo iterativo, tendo como objetivo localizar a estrutura de modo a que se forme a saliência desejada.

De forma a prever a resposta da linha de costa, González e Medina (2001) recorreram aos parâmetros da formulação de Hsu e Evans (1989), que permite determinar o perfil de equilíbrio estático da praia a sotamar do quebramar destacado.

#### 2.3.6. IMPACTES

A implantação de um quebramar destacado origina vários impactes hidrodinâmicos e bio-morfológicos e impactes socio-económicos e paisagísticos na área envolvente.

No que diz respeito à hidrodinâmica, a presença desta estrutura provoca alterações nas correntes e na agitação, em que as ondas são essencialmente difratadas e refratadas. A formação de correntes complexas e remoinhos que se criam devido à existência de estruturas de proteção costeira podem tornar perigosa a prática balnear, sendo este problema difícil de mitigar pois estes fenómenos, de difração e refração, ainda que usando modelos reduzidos ou numéricos, são de grande complexidade. Para além disso, pode acontecer a estagnação das águas a sotamar, principalmente se o quebramar for emerso e se a amplitude da maré for pequena, visto que caso seja submerso os galgamentos provocados por este motivam a renovação das águas a sotamar. A estagnação das águas pode afetar a prática balnear pois promove a proliferação de espécies de algas que por sua vez podem diminuir a qualidade das praias devido a odores desagradáveis e à turvação das águas.

O quebramar destacado permite a acumulação de sedimentos devido às correntes de difração, no entanto, também podem ocorrer erosões na direção da corrente longitudinal da costa. Ainda assim, comparativamente com o caso dos esporões, cuja redução do transporte sedimentar longitudinal é maior, este fenómeno é menos acentuado. Junto à cabeça dos quebramares destacados, podem também ocorrer erosões localizadas e infraescavações dos fundos, devido às correntes que aí se originam. No caso de um sistema de quebramares, este efeito é mais acentuado, pois as aberturas entre estes originam velocidades superiores.

Em termos bio-morfológicos, a presença do quebramar destacado pode favorecer a criação de novos habitats, pois promove a fixação de novas espécies marinhas e de aves marítimas. No entanto, como foi referido anteriormente, a multiplicação de espécies, em caso de águas paradas, pode prejudicar a qualidade das praias.

Do ponto de vista paisagístico, este tipo de obras tem, no geral, um impacte visual negativo, efeito este que pode ser minimizado na fase de dimensionamento, nomeadamente se forem utilizados blocos naturais como enrocamento e se a cota do coroamento for a mais reduzida possível.

Como é facilmente perceptível, o impacte socio-económico de um quebramar destacado é positivo, pois o objetivo deste é melhorar exatamente esse aspeto. A construção desta estrutura contribui para melhorar as condições balneares, aumentar o perímetro da praia e melhorar a proteção das frentes urbanas junto à linha de costa. No entanto, o impacte paisagístico deve ser tido em conta de modo a que não seja prejudicada a mais-valia social e económica que a estrutura representa para a zona.





# 3

## Software MIKE

### 3.1. INTRODUÇÃO

O *software MIKE by DHI (Danish Hydraulic Institute)* é uma ferramenta avançada de modelação, utilizada nos ramos da engenharia e gestão hidráulica.

Esta ferramenta pode ser aplicada em vários domínios da Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, entre eles: oceanografia, evolução da linha de costa, portos, transporte de sedimentos, ecologia e qualidade de água, águas superficiais e subterrâneas, rios, inundações, alterações climáticas, gestão de água, distribuição de água, sistemas de recolha, tratamento de águas residuais e escoamento em meios porosos.

O *software MIKE by DHI* inclui vários programas destinados a distintas análises, entre os quais:

- *MIKE Zero*: Editores, visualizadores e ferramentas de processamento de dados comuns;
- *MIKE HYDRO*: sistema de modelação para o planeamento integrado de uma bacia hidrográfica;
- *MIKE 11*: sistema de modelação de rios e canais;
- *MIKE 21*: modelação 2D de estuários, zonas costeiras e marinhas;
- *MIKE 3*: modelação 3D de águas profundas, estuários e zonas costeiras e marinhas;
- *MIKE 21/3 Integrated Models*: sistema de modelação com a integração automática dos modelos MIKE 21 e MIKE 3;
- *LITPACK*: sistema de modelação para o transporte de sedimentos não coesivos ao longo de praias quase uniformes;
- *MIKE FLOOD*: sistema de modelação de uma e duas dimensões ligado dinamicamente para estudos de cheias e inundações urbanas;
- *MIKE SHE*: sistema de modelação dinâmica para a gestão integrada dos recursos de águas subterrâneas e superficiais.

Os modelos criados nos programas podem ajudar na gestão, organização e análise de dados, na decisão de modos de gestão de água sustentáveis, no auxílio de sistemas de alerta monitorizados em tempo real e na otimização de operações e planeamento.

Importa referir que todas as descrições apresentadas neste capítulo acerca do *software MIKE* foram retiradas de informação disponibilizada pelo grupo DHI, nomeadamente do guia de ajuda (*Help*) e do *website* oficial (<http://www.mikepoweredbydhi.com>).

No presente trabalho, apenas serão aplicados os sistemas *MIKE Zero*, visto ser o sistema base de edição, visualização e processamento de dados, e *MIKE 21/3 Integrated Models* por se tratar de um sistema de modelação 2D e 3D, que permite o acoplamento entre os diferentes módulos, aplicado a zonas costeiras. Por esta razão, somente estes sistemas serão descritos mais detalhadamente nos capítulos que se seguem.

## 3.2. MIKE ZERO

### 3.2.1. INTRODUÇÃO

*MIKE Zero* é uma plataforma que dá acesso a todos os diferentes sistemas de modelação do DHI. Além disso, contém uma série de funcionalidades, que podem ser usadas independentemente do sistema de modelação utilizado, que incluem edição de dados, ferramentas de gráficos e ferramentas de análise diversas.

Este sistema permite a criação de simulações, análise de pré e pós-processamento, visualização e apresentação de resultados. Entre outras tarefas, inclui ferramentas para:

- Batimetria e criação de malhas;
- Visualização e análise de dados;
- Funcionalidades de edição de gráficos.

Como foi referido, *MIKE Zero* dispõe de diversas ferramentas, entre as quais: *Time Series*; *Profile Series*; *Data manager*; *Grid Series*; *Plot Composer*; *Result Viewer*; *Bathymetries*; *Climate Change*; *Ecolab*; *Auto Calibration*; *EVA Editor*; *Mesh Generator*; *Data Extraction FM*; *MIKE Zero Toolbox*.

Nos capítulos seguintes, serão apresentadas as ferramentas essenciais para a criação de uma malha computacional e para a criação dos parâmetros de dados de entrada para os modelos de simulação da série FM (*Flexible Mesh*). Dada a variedade de ferramentas disponíveis no *MIKE Zero*, apenas serão abordadas as aplicadas no presente trabalho, nomeadamente *Mesh Generator* e *Time Series*.

A utilização de uma malha flexível permite a existência de uma variedade de dimensões de elementos finitos para se adaptar a condicionantes locais, otimizando o cálculo, isto é, uma flexibilidade elevada para adaptação da resolução da malha dentro do modelo.

### 3.2.2. CRIAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL

A ferramenta *Mesh Generator* proporciona um ambiente de trabalho (Fig.3.1) que permite criar uma malha digital detalhada para aplicação nos modelos *MIKE Zero Flexible Mesh* (FM). O fornecimento desses modelos com uma malha adequada é essencial para a obtenção de resultados confiáveis nas simulações do modelo.

Configurar uma malha inclui a seleção adequada da área a ser modelada, a resolução adequada da batimetria, escoamento, vento e campo de ondas em análise e a definição de códigos para as fronteiras abertas e terrestres.

O ficheiro da malha exportado é um ficheiro ASCII (extensão .mesh) que inclui informação da posição geográfica e da profundidade da água em cada nó da malha, compreendendo também informação sobre a conectividade dos nós dos elementos triangulares e quadrangulares. Todas as especificações para gerar o ficheiro da malha são guardadas num ficheiro de definição da malha (extensão .mdf), que pode ser modificado.

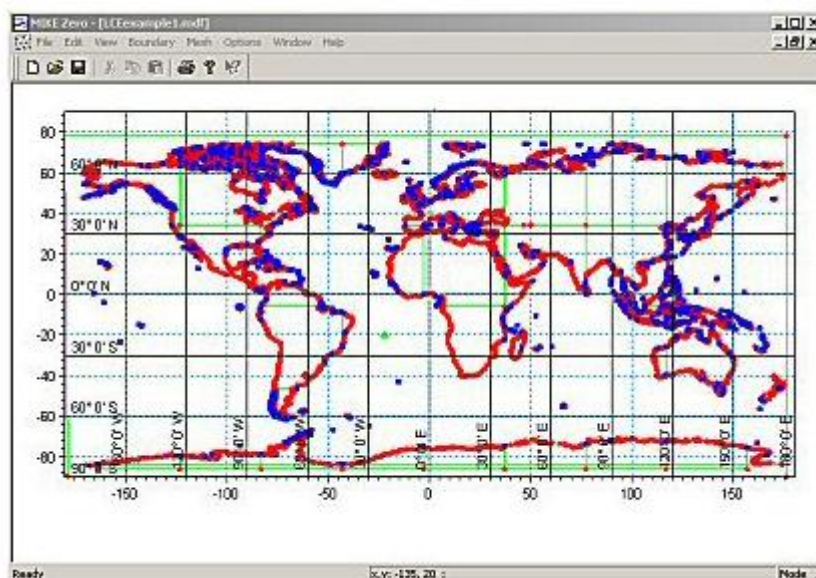


Fig. 3.1 – Fronteira Terra/Água num domínio que cobre o planeta Terra (<http://www.mikepoweredbydhi.com>)

A ferramenta *Mesh Generator* inclui funcionalidades para a importação de dados brutos de várias fontes externas como, por exemplo, sondagens XYZ, contornos XYZ, batimetrias do *MIKE 21* e dados exportados do *MIKE C-MAP*, ou para criar dados manualmente usando as ferramentas de desenho disponíveis. Além disso, é também possível importar imagens de fundo, tais como mapas, e usá-los durante a edição de dados ou para, por exemplo, reforço de apresentações gráficas.

A utilização do *Mesh Generator* compreende três fases essenciais, em que a primeira passa pela definição das fronteiras do modelo – fronteiras fechadas (terra-água) e fronteiras abertas. A definição destas fronteiras é feita importando os ficheiros de fronteira terra-água (em formato XYZ) ou desenhando arcos na área do espaço de trabalho.

A referida definição da fronteira é essencial, sendo por isso corrente a necessidade de inserção e definição de nós, vértices, arcos e polígonos, conceitos estes representados na Fig.3.2, cujo significado é importante conhecer:

- Um nó define o ponto de início e fim de um arco. Um arco fechado terá apenas um nó enquanto um arco aberto terá dois nós;
- Um vértice é um ponto interno ao longo de um arco;
- Um arco é um número de segmentos de linha composto por zero ou mais vértices e um ou dois nós;
- Um polígono é um circuito fechado composto por um arco fechado ou dois ou mais arcos abertos. Um polígono não é explicitamente definido pelo utilizador, é gerado automaticamente ao fechar um arco ou um conjunto de arcos. Ao definir um polígono, este pode ser incluído ou excluído do domínio, por exemplo, no caso de representar uma ilha, ou pode ser identificado como uma região onde se pretende gerar uma malha.

A definição de um grande polígono, que define o domínio, e um número de polígonos menores, que definem as áreas terrestres dentro da área do domínio, caso existam, deve encerrar a definição da fronteira.

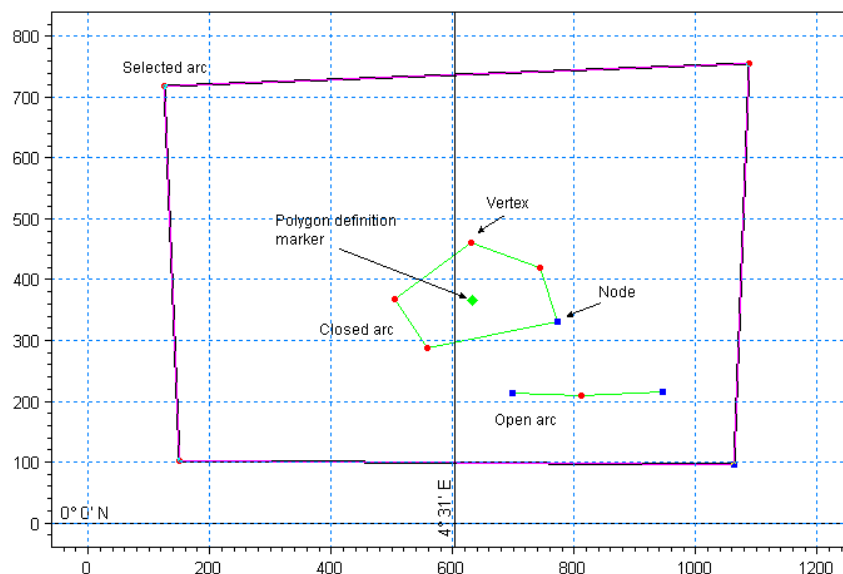


Fig. 3.2 – Conceitos da ferramenta *Mesh Generator* (<http://www.mikepoweredbydhi.com>)

Para além da delimitação da fronteira, é essencial caracterizá-la como sendo fechada ou aberta. Por defeito, a ferramenta *Mesh Generator* assume, ao gerar a malha, que todas as fronteiras são fronteiras terrestres, ou seja, fronteiras fechadas. De modo a definir as fronteiras como abertas, é necessário especificar o valor de atributo de todos os nós ao longo do arco que representa essa mesma fronteira. O valor numérico do campo de atributo é também utilizado para distinguir as diferentes fronteiras abertas na malha. Assim, cada fronteira definida na malha deve ser associada a uma condição de fronteira. Para isso, deve ser associado o valor de 1 ao campo de atributo caso se trate de uma fronteira fechada, ou seja, terra-água, enquanto que para as fronteiras abertas, o número definido deverá ser superior a 1.

Numa segunda fase, quando o modelo da fronteira estiver concluído, é possível gerar uma malha independente da profundidade, podendo esta ser tida em conta posteriormente para uma otimização da malha.

Para a criação de uma malha, são necessários pelo menos três pontos para dar início à mesma e, para além disso, esta só é realizada dentro de polígonos, sendo que, a fim de criar uma malha para uma zona costeira, será necessário ter um polígono que abranja a área total que se pretende que seja modelada.

No caso da malha triangular, aplicada no trabalho em curso, a sua criação pode ser controlada através da definição dos seguintes critérios: área máxima do elemento triangular, menor ângulo admitido entre dois lados do triângulo (assimetria máxima dos elementos) e número máximo de nós criados.

Na Fig.3.3, apresenta-se o exemplo de uma malha onde se definiram dois valores distintos para o critério de área máxima do elemento triangular, sendo que para isso foi necessária a definição de dois polígonos na área do domínio.

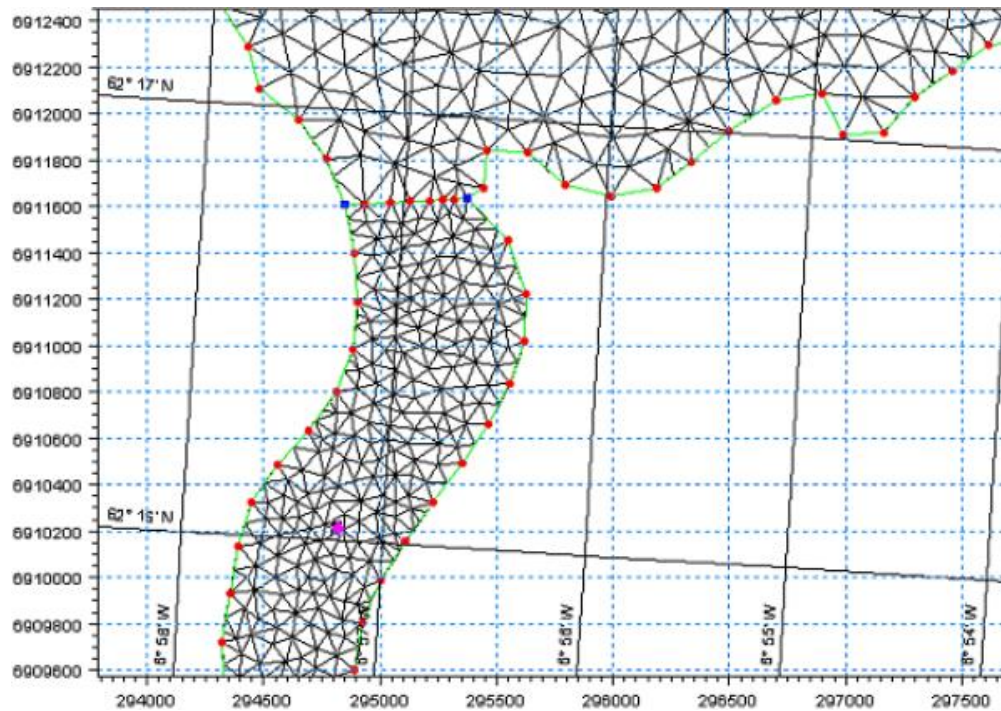


Fig. 3.3 – Malha gerada usando duas zonas com áreas máximas do elemento triangular diferentes (DHI Software, 2007)

Após a malha ter sido definida é possível conhecer o número de elementos e nós que foram gerados.

Recorrendo à funcionalidade *Smooth Mesh*, é possível suavizar a malha gerada, reduzindo as diferenças de área e de ângulos entre elementos vizinhos, ou seja, os elementos são homogeneizados. O algoritmo de suavização só se aplica aos elementos de malha triangulares. Após a sua aplicação, se a malha continua a ser a mesma, significa que a malha geral está homogeneizada.

Por último, a malha pode ser refinada, dimensionando as áreas de elementos de acordo com a profundidade da água no ponto central do elemento. Este passo requer a importação da informação de profundidade da água. Pode-se definir vários polígonos dentro da área de espaço de trabalho e, assim, ter a possibilidade de refinar a malha nas diferentes áreas de forma independente.

Para terminar, a malha criada deve ser exportada para um ficheiro de formato .mesh para poder ser usada num dos modelos de simulação da série FM.

Na Fig.3.4, apresenta-se um exemplo de um modelo com a malha gerada e respetiva batimetria e fronteiras fechadas (1) e abertas (2,3).

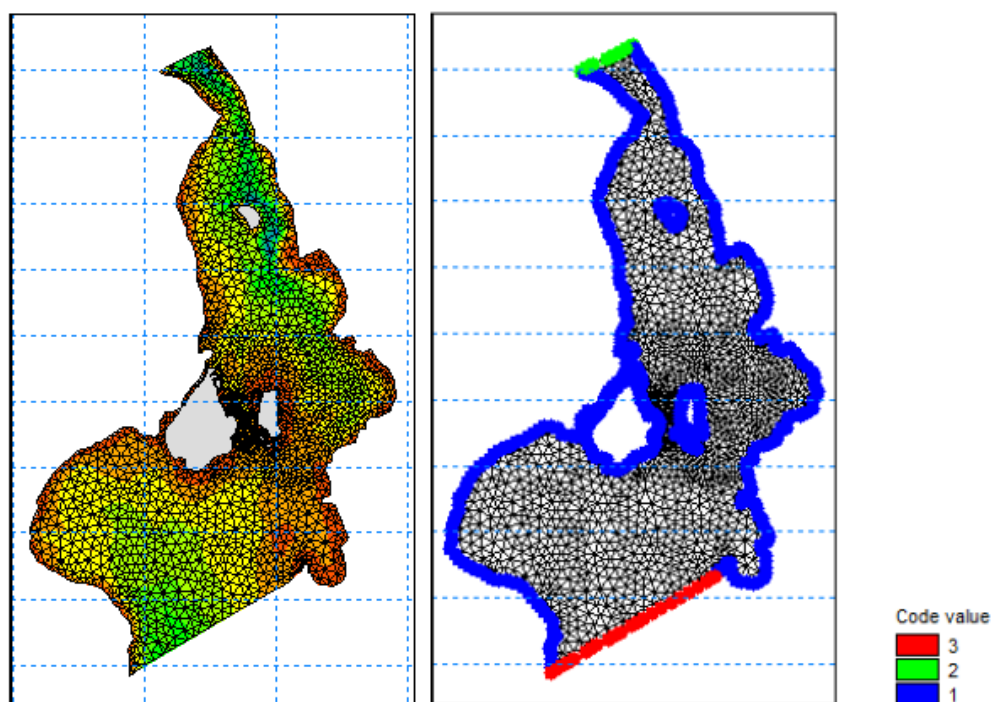


Fig. 3.4 – Ficheiro da malha de um modelo que cobre o estreito de Oresund – batimetria (à esq.) e fronteiras fechada (1) e abertas (2,3) (à dir.) (MIKE by DHI, 2012)

### 3.2.3. PARÂMETROS DE ENTRADA

A definição de parâmetros de entrada para os modelos de simulação é feita recorrendo às ferramentas disponíveis no MIKE Zero, sendo que, no presente trabalho, foi apenas necessário a utilização da ferramenta *Time Series*.

A ferramenta *Time Series* permite visualizar e editar dados de séries temporais, sendo estes exibidos em forma de gráfico e tabela. Esta ferramenta guarda os dados em formato .dfs0, formato este que permite a utilização destes dados nos modelos de simulação da série FM. Os dados podem representar, por exemplo, parâmetros referentes a níveis de água ou características do vento que, posteriormente, poderão ser introduzidos num modelo de simulação, como exemplificado na Fig.3.5.

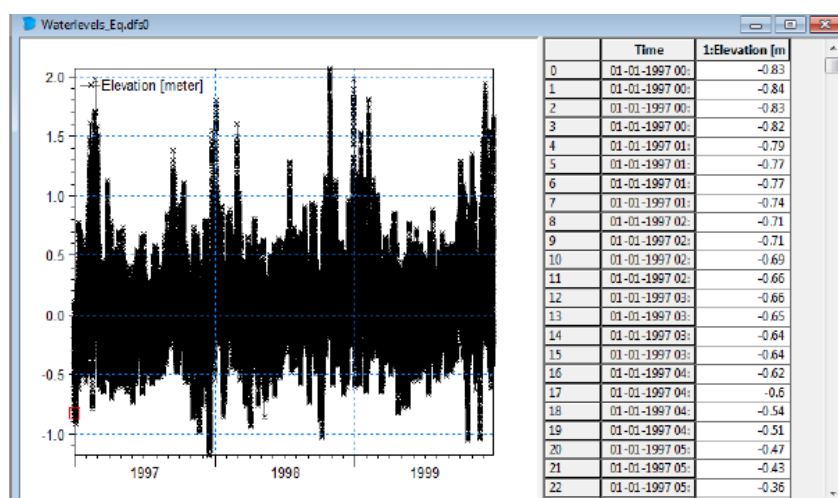


Fig.3.5 – *Time Series Editor* com nível de água importado de Torsminde (MIKE by DHI, 2014)

### 3.3. MIKE 21/3 INTEGRATED MODELS

#### 3.3.1. INTRODUÇÃO

O *software MIKE 21/3 Integrated Models* é um sistema de modelação abrangente para escoamentos com superfície livre 2D e 3D, aplicado na simulação de fenómenos hidráulicos e outros relacionados com estes, em lagos, estuários, baías, áreas costeiras e mares, onde a estratificação pode ser negligenciada.

Este *software* contém os seguintes modelos:

- *MIKE 21/3 Coupled Model FM*, sistema de modelação dinâmica para ambientes costeiros e estuarinos;
- *MIKE 21/3 Particle Tracking*, usado para simular o transporte de substâncias dissolvidas e suspensas descarregadas ou acidentalmente derramadas em lagos, estuários, áreas costeiras ou ao largo;
- *MIKE 21/3 Oil Spill*, usado para simular o derramamento de hidrocarbonetos, nomeadamente petróleo, em lagos, estuários, áreas costeiras ou ao largo.

O modelo *MIKE 21/3 Coupled Model FM* será descrito mais detalhadamente, visto ser dos três modelos mencionados o único utilizado no trabalho em curso, sendo composto pelos seguintes módulos:

- *Hydrodynamic Module*;
- *Spectral Wave Module*;
- *Transport Module*;
- *ECO Lab/Oil Spill Module*;
- *Mud Transport Module*;
- *Sand Transport Module*;
- *Particle Tracking Module*.

Os dois primeiros módulos enumerados são os componentes computacionais base do sistema de modelação, sendo possível simular a interação mútua entre ondas e correntes, usando um acoplamento dinâmico entre estes dois módulos. Para além disso, este sistema de modelação também inclui um acoplamento dinâmico entre os módulos *Mud Transport*, *Particle Tracking* e *Sand Transport* e o *Hydrodynamic Module* e o *Spectral Wave Module*. Assim, pode ser extraído um *feedback* completo das alterações do leito no pós-processamento dos cálculos de ondas e escoamento.

Na Fig.3.6, está representada a janela de simulação do modelo, onde são visíveis os módulos supracitados que podem ser incluídos e a interface gráfica do *software*.



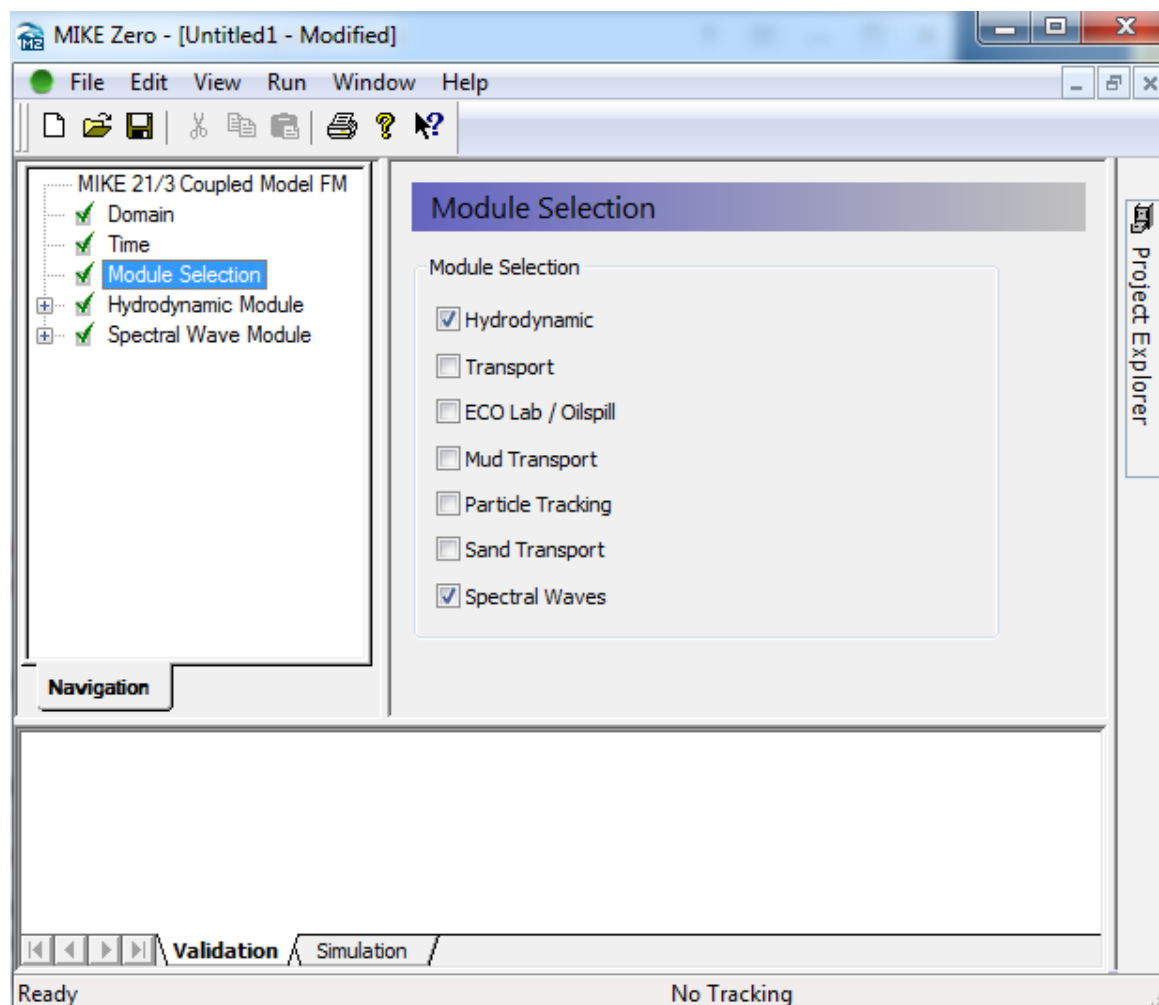


Fig.3.6 – Janela do modelo de simulação utilizando o MIKE 21/3 Coupled Model FM

As áreas de aplicação deste modelo estão, geralmente, relacionadas com problemas onde fenómenos de escoamento e transporte são importantes, com ênfase em aplicações costeiras e marinhas, onde a flexibilidade associada a malhas não estruturadas pode ser utilizada. Este modelo pode ser usado para investigar a evolução morfológica da batimetria próxima da costa devido ao impacto de obras de engenharia, como estruturas costeiras e trabalhos de dragagem, que podem incluir quebra-mares, esporões, alimentação artificial de areia, portos, entre outros, assim como para investigar a evolução morfológica de embocaduras.

O presente modelo é mais adequado para investigações morfológicas de médio prazo (várias semanas a meses) sobre uma área costeira limitada, sendo que as dimensões típicas são cerca de 10 km na direção ao longo da costa e 2 km na direção *offshore*.

Para além disso, este modelo trabalha em malhas flexíveis, o que o torna particularmente adequado para lidar com a resolução espacial variável no domínio do modelo, permitindo uma maior resolução apenas onde é necessário.



Em suma, as principais funcionalidades do *MIKE 21/3 Coupled Model FM* são as seguintes:

- Acoplamento dinâmico entre os módulos;
- *Feedback* completo das alterações do leito no pós-processamento dos cálculos de escoamento e de onda;
- Fácil alternância entre cálculos 2D e 3D;
- Grau ótimo de flexibilidade da malha.

### 3.3.2. PARÂMETROS DE BASE

O primeiro passo da construção do modelo passa por especificar os parâmetros de base para a discretização do espaço e do tempo e por selecionar os módulos que se pretende que sejam incluídos na simulação.

A introdução de uma malha adequada é essencial para a obtenção de resultados confiáveis a partir do modelo. Como já foi referido anteriormente, o ficheiro da malha é gerado em *MIKE Zero - Mesh Generator*, ferramenta para a criação e manipulação de malhas, incluindo a definição e edição das fronteiras. Este ficheiro inclui informação da posição geográfica e da batimetria para cada nó da malha e da conectividade entre os nós.

O *MIKE 21/3 Coupled Model FM*, baseado na abordagem da malha flexível, possibilita optar por simular em 2D ou em 3D. A escolha entre um modelo 2D e 3D depende de um número de fatores. Por exemplo, em águas pouco profundas, o vento e as correntes de maré são muitas vezes suficientes para manter a coluna de água bem misturada, ou seja homogénea em salinidade e temperatura. Em tais casos, um modelo 2D pode ser usado. Em corpos de água com estratificação, seja por densidade ou por espécie (ecologia), um modelo 3D deve ser aplicado. Posto isto, no presente trabalho, apenas foram feitas simulações 2D, pois a simulação 3D tem grande relevância no estudo da variação da temperatura e salinidade, parâmetros estes que não são de interesse de estudo. Visto ter sido aplicada apenas a simulação 2D, serão expostas somente descrições acerca de simulações bidimensionais.

O período de tempo da simulação é referido nesta fase, especificando a data de início da simulação, o número de *time steps* e o intervalo de *time steps*. Os *time steps* discretos são usados para determinar a frequência para a qual o *output* pode ser obtido a partir dos diferentes módulos e para sincronizar o acoplamento entre os diferentes módulos. A simulação começa sempre com o *time step* número 0 que corresponde à data e hora de início da mesma.

Este modelo compreende vários módulos, enumerados no capítulo anterior, que devem ser selecionados nesta fase para serem incluídos na simulação.

Os dois componentes computacionais de base, o *Hydrodynamic Module* e o *Spectral Wave Module*, podem ser usados como módulos autónomos. O módulo *Sand Transport* pode também ser utilizado como um módulo independente, quando o modo onda-corrente é aplicado.

Os três módulos supramencionados foram os especificamente aplicados no presente trabalho, pelo que são alvo de uma descrição nos subcapítulos que se seguem.

### 3.3.3. HYDRODYNAMIC MODULE

O *Hydrodynamic Module* (HD) fornece as bases para os cálculos realizados em muitos outros módulos, mas pode também ser usado de forma independente. Este módulo simula as variações do nível da água e do escoamento em lagos, estuários e áreas costeiras, tendo em conta variações de densidade, batimetria e forças externas.

As suas áreas de aplicação mais comuns são:

- Avaliação das condições hidrográficas para a conceção, construção e operação de estruturas;
- Estudos de avaliação de impacto ambiental;
- Otimização de portos e infraestruturas de proteção costeira;
- Hidrodinâmica de lagos e reservatórios;
- Arrefecimento, recirculação e dessalinização de água;
- Inundações costeiras e tempestades;
- Sistemas de previsão e alerta.

O módulo HD é usado para resolver problemas tridimensionais (3D) e bidimensionais (2D). O sistema de modelação baseia-se nas Equações Médias de Reynolds (RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) para fluidos incompressíveis, invocando os pressupostos de Boussinesq e de pressão hidrostática. Portanto, o modelo consiste em equações de continuidade, quantidade de movimento, temperatura, salinidade e densidade. A densidade não depende da pressão mas sim da temperatura e salinidade. As equações de Navier-Stokes descrevem o movimento de um fluido e são compostas pela equação de conservação da massa, ou equação da continuidade, e da equação da conservação da quantidade de movimento.

Na simulação 2D, o modelo é baseado nas equações de águas pouco profundas – integração em profundidade das equações de Navier-Stokes.

O tempo e a precisão da simulação podem ser controlados especificando a ordem dos esquemas numéricos que são usados nos cálculos numéricos. Tanto o regime de integração no tempo como a discretização do espaço podem ser especificados, optando-se por um esquema de *ordem inferior* (primeira ordem) ou um esquema de *ordem superior*. O esquema de *ordem inferior* é mais rápido, mas menos preciso.

Para a simulação 2D, a integração no tempo das equações de águas pouco profundas e das equações de transporte (advecção-dispersão) é realizada utilizando um esquema explícito. Devido à restrição de estabilidade, usando um esquema explícito, o intervalo de tempo deve ser selecionado de modo a que o número CFL (Courant-Friedrich-Lévy) seja inferior a 1. Um intervalo de tempo variável é utilizado no cálculo de ambas as equações, de águas pouco profundas e de transporte, determinadas de modo que o número CFL seja menor do que um número crítico em todos os nós do meio computacional. O número CFL para as equações de transporte é, geralmente, menos restritivo do que o número CFL para as equações de águas pouco profundas. Assim, um intervalo de tempo maior é, normalmente, utilizado para as equações de transporte do que para as equações de águas pouco profundas.

As principais funcionalidades e efeitos incluídos no presente módulo são os seguintes:

- Correção da profundidade;
- Zonas secas e/ou inundadas;
- Densidade;
- Viscosidade turbulenta;
- Resistência do leito;
- Força de Coriolis;

- Força do vento;
- Cobertura de gelo;
- Potencial de maré;
- Precipitação/Evaporação;
- Tensão de radiação da onda;
- Fontes;
- Estruturas.

É possível definir uma correção para a batimetria definida na malha, a ser incluída nas simulações, podendo ser aplicada em casos onde as alterações do leito precisam de ser contabilizadas, por exemplo, para a continuação de uma simulação anterior ou para a modelação de tsunamis de forma a simular as flutuações do nível do leito durante um terramoto.

No caso de o modelo estar localizado numa zona onde é comum a ocorrência de inundações e/ou zonas secas, é possível especificar uma profundidade de zona seca, uma profundidade de inundação e uma profundidade húmida. Quando a profundidade da água é inferior à profundidade húmida, o problema é reformulado e, apenas se a profundidade de água for menor do que a profundidade de zona seca, o elemento é removido da simulação. A profundidade de inundação é utilizada para determinar quando um elemento é inundado, ou seja, reintroduzido no cálculo.

A densidade é assumida como sendo função da temperatura e salinidade. O *software* permite a consideração de condições barotrópicas ou baroclínicas. Em condições barotrópicas, tanto a temperatura como a salinidade serão constantes e a densidade não será atualizada durante a simulação. Quando a densidade é considerada como sendo função da temperatura e/ou salinidade (condições baroclínicas), a densidade é atualizada a partir dos campos de temperatura e salinidade. Na maioria dos casos, o efeito dos gradientes de densidade nas equações de águas pouco profundas (2D) é pequeno e, portanto, os termos de densidade podem ser desprezados. Se a variação de densidade em função da profundidade é significativa deve-se aplicar um modelo de escoamento tridimensional.

A viscosidade turbulenta é uma propriedade do escoamento. A viscosidade turbulenta horizontal pode ser definida segundo a formulação de viscosidade constante, especificando o coeficiente de viscosidade, ou a formulação de Smagorinsky (1963), especificando o coeficiente de Smagorinsky.

A resistência do leito é outro parâmetro incluído no módulo que pode ou não ser considerado. No caso da simulação 2D, a resistência do leito pode ser especificada segundo o número de Chezy ou o número de Manning.

Caso seja pretendido, é possível incluir no modelo o efeito da força de Coriolis, como constante no domínio, em que a força de Coriolis é calculada usando uma latitude de referência especificada constante, ou variável no domínio, em que a força é calculada com base na informação geográfica dada no ficheiro da malha.

A consideração do efeito do vento sobre o escoamento pode ser feita num dos seguintes modos:

- Constante: o vetor vento tem a mesma direção e a mesma intensidade durante todo o período de simulação e ao longo de toda a área do modelo;
- Variável no tempo e constante no domínio: a intensidade e a direção variam durante o período de simulação, mas mantêm-se ao longo de toda a área do modelo;
- Variável no tempo e no domínio: a intensidade e a direção variam durante o período de simulação e ao longo de toda a área do modelo.

O atrito do vento pode ser assumido como constante ou variável consoante a sua velocidade. Neste último caso, o atrito é linearmente interpolado entre dois valores em função da velocidade do vento.

Em algumas regiões, é essencial a contabilização dos efeitos da cobertura de gelo sobre o escoamento, caracterizada pela concentração e/ou espessura de gelo.

O potencial de maré é uma força gerada pelas variações da gravidade devido ao movimento relativo da terra, da lua e do sol, que pode também ser considerada ou não nos modelos de simulação. O potencial de maré é uma força fraca e é, geralmente, significativa em corpos de água fechados profundos como, por exemplo, Mar Mediterrâneo ou Golfo do México, ou em modelos de grande escala, por exemplo, oceano Pacífico.

Em aplicações onde a queda de chuva é importante para o escoamento, pode-se incluir a precipitação na simulação, sendo esta introduzida como precipitação ou precipitação útil (precipitação menos evaporação). No caso de não ser introduzida a precipitação útil, a evaporação pode ser incluída separadamente.

As tensões de segunda ordem, devidas à rebentação de ondas de curto período, podem ser incluídas na simulação. As tensões de radiação atuam como forças de condução do fluxo médio e podem ser usadas para calcular o fluxo induzido pela onda. Estas tensões podem ser incluídas por leitura de valores a partir de um ficheiro de dados ou diretamente a partir de uma simulação SW (*Spectral Wave Module*) acoplada. Uma vez que as tensões de radiação da onda descrevem o fluxo médio ao longo de um período de onda, as tensões são relacionadas com uma determinada profundidade de água. A aplicação das tensões de radiação da onda em simulações com profundidades de água variáveis no tempo (por exemplo, maré e/ou tempestades) é possível, mas o erro introduzido pelas mudanças na profundidade da água deve ser considerado.

Por último, o modelo de simulação permite ainda a introdução de fontes, por exemplo, os efeitos dos rios podem ser incluídos como fontes pontuais, e estruturas, sendo que podem ser incluídos seis diferentes tipos: açudes, galerias, diques, comportas, *piers* e turbinas ou para além destas é também possível incluir estruturas compostas combinando duas ou mais estruturas definidas.

No modelo, é necessário definir as condições iniciais da simulação, especificando os valores iniciais para as variáveis hidrodinâmicas como constante, elevação do nível da água variável no espaço ou velocidades e profundidade de água variáveis no espaço. Para evitar a geração de ondas de choque, é recomendado que a elevação da superfície da água inicial corresponda aproximadamente às condições de fronteira, no início da simulação.

A definição das condições de fronteira é fundamental em todos os modelos do *software*. Para isso, é necessária a especificação de informação referente a cada fronteira, tendo como opção os seguintes tipos, em que o primeiro está associado a fronteiras terrestres e os restantes a fronteiras abertas:

- Terra;
- Velocidades especificadas;
- Caudal especificado;
- Nível da água especificado;
- Volume de descarga especificado – distribuído como teria sido num campo de escoamento uniforme com a lei de resistência de Manning aplicada, não sendo aplicado em situações onde há uma grande variação de temperatura ou salinidade;
- Condição Flather - a condição Flather (1976) é uma das mais eficientes condições de fronteira aberta.

Por fim, os resultados de saída da simulação (*outputs*) em cada elemento de malha e para cada *time step*, consistem em variáveis básicas e variáveis adicionais. As variáveis básicas disponíveis são:

- Profundidade da água e elevação da superfície da água;
- Densidades de fluxo nas direções principais;
- Velocidades nas direções principais;
- Densidades, temperaturas e salinidades.

As variáveis adicionais são as seguintes:

- Velocidade e direção da corrente;
- Velocidades do vento;
- Pressão do ar;
- Precipitação/evaporação;
- Número CFL;
- Viscosidade turbulenta;
- Área dos elementos da malha.

No que se refere a cálculos 2D, os resultados de saída podem ser guardados em pontos, linhas e áreas definidos.

Como exemplo de variável de saída incluída no módulo HD, representa-se na Fig. 3.7 a variação do nível médio da água.

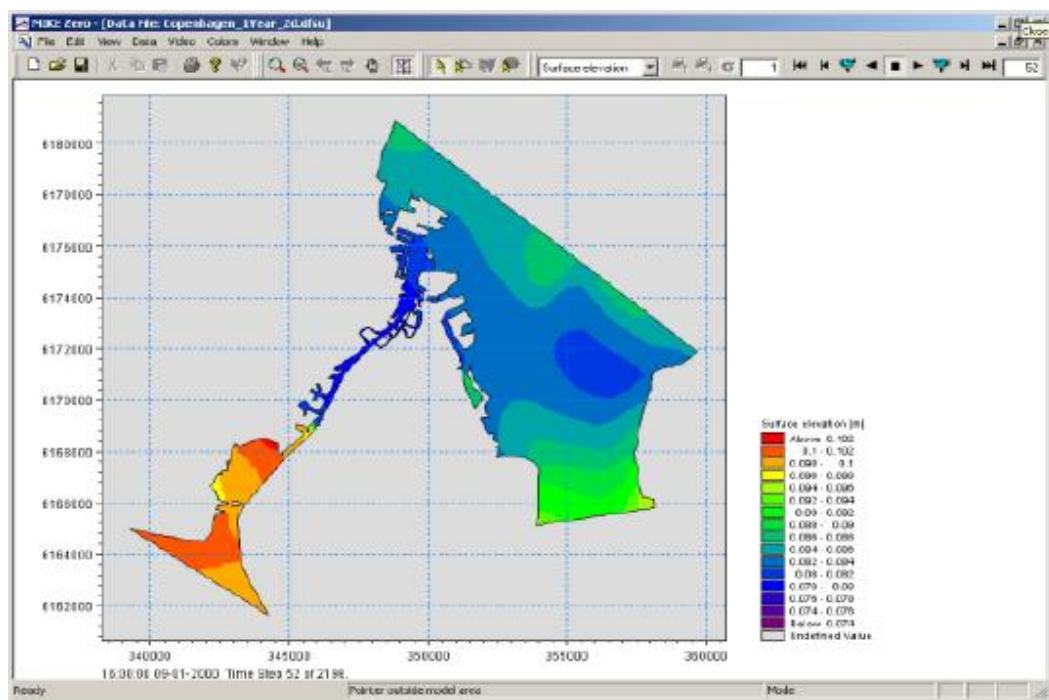


Fig. 3.7 – Nível médio da água de um modelo que cobre o porto de Copenhaga (MIKE by DHI, 2013a)

### 3.3.4. SPECTRAL WAVE MODULE

O *Spectral Wave Module* (SW) simula o crescimento, diminuição e transformação de ondas geradas pelo vento (vagas) e por tempestades em alto mar (ondulação ou *swell*) em áreas costeiras e *offshore*.

O módulo SW inclui uma formulação paramétrica de dissociação direcional (*Directionally decoupled parametric formulation*) e uma formulação espectral completa (*Fully spectral formulation*), modelo de onda de terceira geração, em que todos os processos relevantes são representados de forma explícita, sem restrições à priori sobre a evolução do espectro (Booij e Holthuisen, 1999).

Para a formulação espectral completa, o modelo inclui os seguintes fenómenos físicos:

- Crescimento da onda por ação do vento;
- Interação não linear onda-onda;
- Dissipação por *white-capping*;
- Dissipação devido ao atrito de fundo;
- Dissipação devido à rebentação da onda induzida pela profundidade;
- Refração e empolamento devido a variações de profundidade;
- Interação onda-corrente;
- Efeito de variação dos níveis de água.

A formulação paramétrica de dissociação direcional é baseada numa parametrização da equação de conservação da ação da onda. A parametrização é feita no domínio da frequência, introduzindo-se os momentos de ordem zero e de primeira ordem do espectro de ação da onda como variáveis dependentes, segundo Holthuisen et al. (1989).

A formulação espectral completa é baseada na equação de conservação da ação da onda, como descrito em Komen et al. (1994) e Young (1999), onde o espectro direcional-frequência de ação da onda é a variável dependente,

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (3.1)$$

em que  $N$  é a densidade de ação,  $\nabla$  a densidade de energia,  $\sigma$  frequência angular,  $t$  tempo,  $v$  velocidade de grupo das ondas e  $S$  termo fonte.

A formulação espectral completa pode, em geral, ser usada em estudos de onda que envolvam o crescimento, diminuição e transformação de ondas em áreas costeiras e *offshore*. Contudo, a formulação paramétrica de dissociação direcional é computacionalmente menos exigente.

O módulo SW compreende duas formulações de tempo: quase-estacionária (*Quasi-stationary formulation*) e instacionária (*Instationary formulation*).

A formulação quase-estacionária é suficiente em várias situações, por exemplo quando a ação (p.e. vento) é lentamente variável no espaço e no tempo, e é em geral computacionalmente menos exigente.

A discretização no espaço geográfico e espectral é realizada utilizando o método de volumes finitos, centrado na célula, através de uma malha triangular não estruturada.

As principais funcionalidades e efeitos incluídos no módulo SW são os seguintes:

- Condições do nível da água;
- Condições da corrente;

- Ação do vento;
- Cobertura de gelo;
- Difração;
- Rebentação da onda;
- Atrito do fundo;
- *White capping*;
- Presença de estruturas.

Para a simulação de ondas em zonas sujeitas à variação de maré, é importante que seja usado o nível de água correto na simulação. Isso irá garantir que as alterações nas condições de onda, devidas à variação das profundidades de água resultantes das marés, são devidamente modeladas. A variação do nível de água pode ser especificado ou segundo a simulação HD (*Hydrodynamic Module*).

Na presença de um campo de correntes, a ação das ondas, e não a energia das ondas, é conservada. O efeito principal da corrente sobre as ondas é que a velocidade da corrente tem que ser tida em consideração no cálculo da velocidade de propagação da ação das ondas. A variação da corrente pode ser especificada ou segundo a simulação HD.

Uma boa previsão da agitação marítima depende de campos de vento precisos, deduzidos a partir de modelos e análises meteorológicas. Como o campo de vento é a força motriz, o módulo SW permite especificar campos de vento precisos e representativos. A ação do vento pode ser especificada segundo a velocidade e direção do vento ou segundo as componentes de velocidade do vento.

É possível ter em conta os efeitos da cobertura de gelo sobre a agitação. Um mar coberto de gelo é considerado como 'terra', assumindo como zero a energia da onda, e as condições de fronteira nos limites do gelo são idênticas às condições de fronteira em linhas costeiras. Os pontos da malha são retirados dos cálculos se a concentração de gelo se tornar maior do que uma concentração definida. Se a concentração de gelo voltar a ser menor que este valor, o ponto de malha correspondente é reativado.

No modelo SW, a difração é também incluída usando a aproximação refração-difração com fase desacoplada proposta por Holthuijsen et al. (2002).

O efeito da rebentação da onda induzido pela profundidade de água ocorre quando as ondas se propagam em zonas muito pouco profundas e a altura de onda é demasiado grande para ser suportada pela profundidade de água, momento no qual as ondas dissipam energia. A formulação utilizada no módulo SW é baseada na formulação de Battjes e Janssen (1978). Se a rebentação da onda for incluída, é necessário especificar o parâmetro de rebentação,  $\gamma$ , utilizado na formulação de rebentação.

Quando as ondas se propagam em águas pouco profundas, a interação onda-fundo torna-se importante, pois há dissipação de energia devido a fricção com o fundo. O coeficiente de dissipação depende das condições hidrodinâmicas e de sedimentos, tal como descrito em Johnson e Kofoed-Hansen (2000). Assim, torna-se necessário definir o atrito do fundo como coeficiente de atrito, fator de atrito, rugosidade de Nikuradse ou tamanho dos sedimentos de areia,  $d_{50}$ .

O efeito de *white capping* (rebentação da onda induzida pelo declive, que ocorre em águas mais profundas quando a altura de onda se torna demasiado grande comparativamente com o comprimento de onda) é primariamente controlado pelo declive das ondas. É importante que este efeito, definido por coeficientes de dissipação, seja incluído na simulação do modelo, pelo que excluindo este efeito deve-se contudo avaliar o seu impacto no estabelecimento de um estado de equilíbrio do mar.

Estruturas como *piers*, turbinas de vento *offshore*, quebramares, barragens e ensecadeiras são possíveis de simular.

As condições iniciais da simulação devem ser definidas por um dos seguintes tipos: espectro zero, em que a ação da onda é definida como zero em todos os nós, espectro segundo fórmulas empíricas (expressão de crescimento do fetch JONSWAP, expressão de crescimento do fetch em águas profundas SPM 1973 ou expressão de crescimento do fetch em águas pouco profundas SPM 1973) ou espectro a partir de um ficheiro inserido.

A definição das condições de fronteira é fundamental em todos os modelos do *software*. Para isso, é necessária a especificação da informação em cada fronteira, tendo como opção os seguintes tipos diferentes de condições de fronteira:

- Fronteiras fechadas, aplicado a fronteiras terrestres ou consideradas como tal;
- Parâmetros de onda, em que devem ser definidos nomeadamente os parâmetros altura de onda significativa, período de pico e direção de onda média;
- Parâmetros de ondas geradas pelo vento e *swell*;
- Espectro de ação da onda;
- Espectro de energia de onda;
- Fronteira lateral;
- Fronteira com reflexão, onde as ondas são refletidas.

Por fim, os resultados de saída da simulação (*output*) em cada elemento de malha e para cada *time step* são os seguintes:

- Altura de onda significativa e máxima;
- Períodos de onda de pico e médio;
- Direção de onda de pico e média;
- Desvio padrão direcional;
- Tensões de radiação;
- Potência da onda.

Na Fig.3.8, apresenta-se um exemplo de uma variável de saída, especificamente a altura de onda significativa.

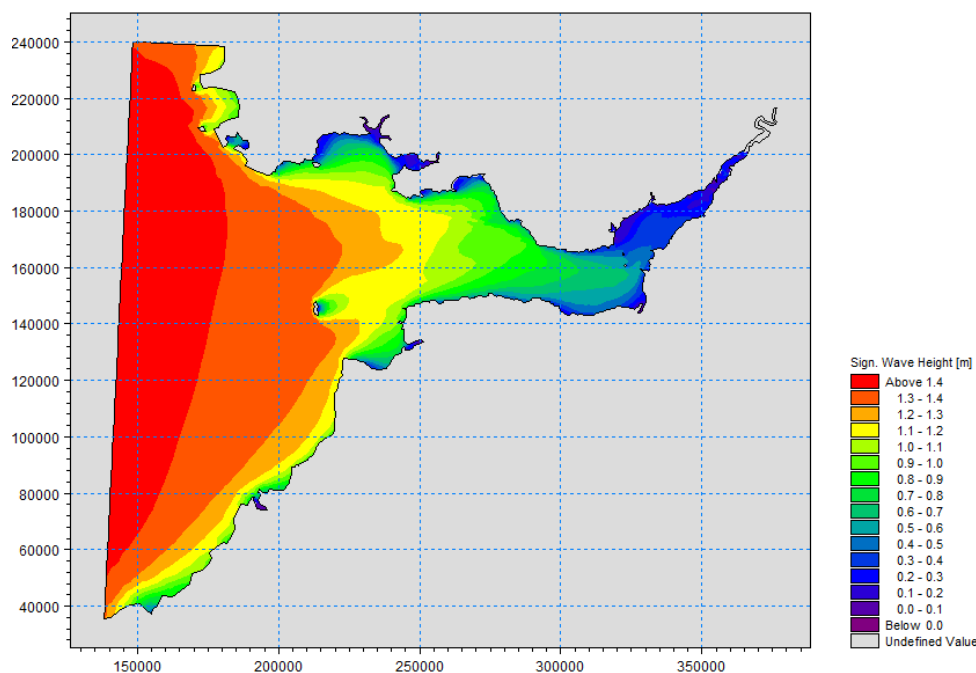


Fig. 3.8 – Altura de onda significativa no canal de Bristol (<http://www.mikepoweredbydhi.com>)



### 3.3.5. SAND TRANSPORT MODULE

O *Sand Transport Module* (ST) calcula o transporte resultante de materiais não coesivos com base nas condições de escoamento horizontal médias estabelecidas nos cálculos hidrodinâmicos e, se for incluída, nas condições de ondas a partir dos cálculos de onda.

Para calcular o transporte de areia, existem dois tipos de modelos diferentes: *Pure current* (corrente) e *Combined current and waves* (corrente e ondas combinadas).

No modelo de corrente, existem duas formas para descrever o transporte de areia: equilíbrio, em que as taxas de transporte são calculadas assumindo condições de equilíbrio, e não-equilíbrio, em que as taxas de transporte são calculadas considerando as condições nos *time steps* anteriores.

Para o modelo de corrente e ondas combinadas, as taxas de transporte de areia são encontradas por interpolação em tabelas de transporte de sedimentos, criadas previamente no programa *MIKE 21 Toolbox "Generation of Q3D Sediment Tables"*. Estas tabelas devem ser geradas de tal forma que qualquer combinação de condições de batimetria, correntes, ondas e sedimentos que figuram na simulação estão dentro do intervalo definido na tabela de transporte.

Além dos dois tipos de modelo, existem alguns parâmetros adicionais para o modelo de simulação que podem também ser definidos: espessura da camada, opção útil quando se simula o transporte de areia em regiões com *bed rock* presente, ou seja, casos com fundo não erodível e fornecimento de areia limitado, e parâmetros força, em que, no escoamento tridimensional, poderá calcular a componente horizontal de velocidade média para ser utilizada no cálculo do transporte de areia, a partir de um dos dois resultados hidrodinâmicos: campo de escoamento 3D e valor da tensão no fundo.

O Módulo ST calcula o transporte de sedimentos não-coesivos, em que dois modos de transporte de sedimentos são descritos: transporte de carga de fundo e transporte de carga em suspensão. Para o tipo de modelo de corrente, a carga de fundo e a carga em suspensão são calculados separadamente, enquanto que para o modelo de corrente e ondas combinadas é usado o transporte de carga total.

O tempo e a precisão da simulação podem ser controlados especificando a ordem dos esquemas numéricos que são usados nos cálculos numéricos. Tanto o regime de integração no tempo como a discretização do espaço podem ser especificados: pode-se optar por um esquema de ordem inferior (primeira ordem) ou um esquema de ordem superior. O esquema de ordem inferior é mais rápido, mas menos preciso.

Como referido anteriormente, para a simulação 2D, a integração no tempo das equações de águas pouco profundas e das equações de transporte (advecção-dispersão) é realizada utilizando um esquema explícito. Também no que respeita ao número CFL, aplica-se no presente módulo o mesmo já explicitado para o módulo HD.

Os principais parâmetros que podem ser incluídos no módulo ST são os seguintes:

- Propriedades dos sedimentos;
- Resistência do leito;
- Forças;
- Fontes.

O cálculo exige o conhecimento das características dos sedimentos da área em estudo. O tamanho dos sedimentos é considerado como um valor representativo para um ponto da malha específico na área de modelação. Isto significa que pode variar espacialmente. Nas curvas de um rio, sedimentos mais grosseiros são frequentemente encontrados em partes mais profundas da secção transversal enquanto sedimentos mais finos são encontrados ao longo das margens internas. Em costas onde ocorre impacto direto das ondas, os sedimentos mais grossos são frequentemente encontrados na praia e em águas pouco profundas enquanto sedimentos mais finos são encontrados em águas mais profundas.

A areia é caracterizada pelo diâmetro de grão médio,  $d_{50}$ . Dependendo do tipo de modelo, é também necessário indicar o coeficiente de uniformidade ou a densidade relativa. Estes parâmetros podem ser constantes ou variáveis no domínio. O volume da areia é descrito pela porosidade do material.

A resistência do leito (resistência ao escoamento) pode ser especificada segundo o número de Chezy, o número de Manning ou segundo a resistência do leito da simulação HD.

O tipo de modelo determina as forças necessárias para calcular o transporte de sedimentos. No caso do modelo de corrente, é apenas necessário um campo de escoamento, mas para o modelo de corrente e ondas combinadas é necessário definir as propriedades da onda. Se o módulo HD for selecionado, o campo de escoamento é sempre incluído diretamente da simulação em curso. O campo de onda pode ser incluído por leitura de valores a partir de um ficheiro de dados ou diretamente a partir de uma simulação SW acoplada.

O *Morphology Module*, que tem em conta as alterações morfológicas no interior da área em estudo, é incluído a partir do momento que o módulo ST é selecionado. Neste módulo, os parâmetros a introduzir são os seguintes: alteração dos fundos máxima (m/dia), erosão das margens e condições de fronteira – terra, gradiente do fluxo de sedimentos de saída nulo e/ou alteração dos fundos de entrada nulo.

No módulo ST, é possível introduzir fontes pontuais de sedimentos suspensos, importantes em muitas aplicações como, por exemplo, libertação de sedimentos de rios e entradas e saídas de centrais de dessalinização.

No final, os resultados de saída da simulação do módulo ST podem ser de dois tipos: transporte de sedimentos e alterações morfológicas resultantes. De entre as variáveis de saída disponíveis destacam-se as seguintes:

- Transporte de carga de fundo – componentes  $x$  e  $y$ ;
- Transporte de carga em suspensão – componentes  $x$  e  $y$ ;
- Transporte de carga total – componentes  $x$  e  $y$ ;
- Alterações do leito;
- Espessura do leito;
- Transporte de carga de fundo – intensidade e direção;
- Transporte de carga em suspensão – intensidade e direção;
- Transporte de carga total – intensidade e direção;
- Acumulação de carga de fundo;
- Acumulação de carga em suspensão;
- Acumulação de carga total;
- Aceleração centrífuga.

A título de exemplo, representam-se de seguida duas variáveis de saída relativas a alterações morfológicas e ao transporte de sedimentos, nas figuras 3.9 e 3.10, respetivamente.

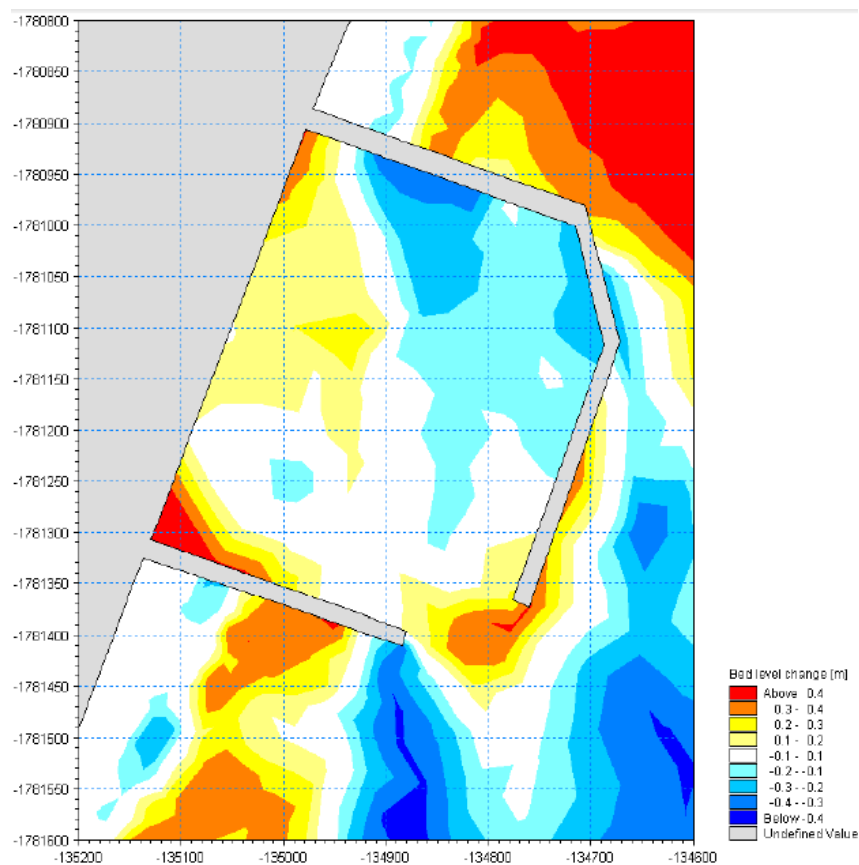


Fig. 3.9 – Alterações morfológicas num porto (MIKE by DHI, 2013b)

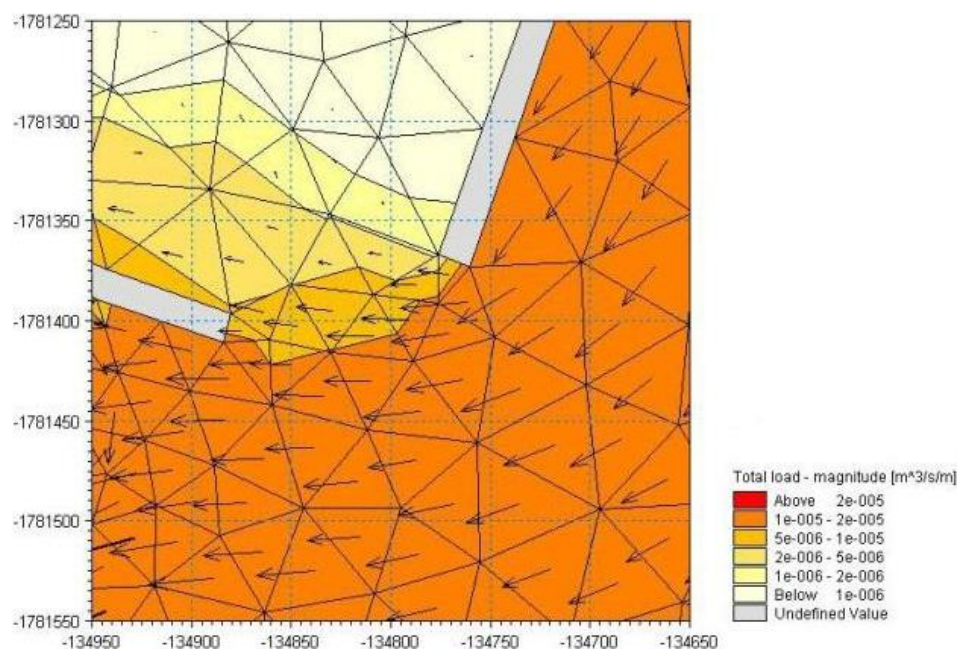


Fig. 3.10 – Detalhe do transporte de carga total na entrada de um porto (MIKE by DHI, 2013b)



# 4

## CASO DE ESTUDO – QUEBRAMAR DESTACADO PARA A FRENTE URBANA DO FURADOURO

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL

A praia do Furadouro situa-se no concelho de Ovar, distrito de Aveiro, e faz fronteira a norte com o concelho de Espinho, a sul com o concelho da Murtosa e a oeste com o Oceano Atlântico, situando-se 30 km a sul da foz do rio Douro e 25 km a norte da embocadura da ria de Aveiro. A região é um importante destino turístico durante a época balnear, para onde se deslocam muitos banhistas, dos quais muitos possuem casa de férias na localidade, que são ocupadas, muitas vezes, apenas nesta época. Desportos como *bodyboard*, *surf*, voleibol e futebol de praia são uma prática comum, com eventos associados que dinamizam toda aquela zona, para além dos apoios de praia e diversos restaurantes, bares e cafés. A sua marginal é composta por uma zona bastante urbanizada e, mais a sul, por uma zona de vegetação natural onde existem passadiços de madeira que protegem a paisagem dunar (Fig.4.1).



Fig.4.1 – Praia do Furadouro (Piqueiro, 2015)

Os problemas de erosão ou recuo da linha de costa fazem parte da história da praia do Furadouro, assim como de muitas outras praias vizinhas da região centro, observando-se um aumento do recuo da linha de costa em relação à frente marginal edificada. A intensa pressão urbana juntamente com as dinâmicas costeiras em curso representam um problema antigo. Já há duas décadas que se manifestam preocupações sobre o futuro da população do Furadouro, que vêm a ser fundamentadas pelos acontecimentos recentes nesta localidade (Veloso Gomes, 2010).

De forma a contrariar a intensa erosão verificada na frente urbana, executaram-se ao longo dos anos várias intervenções de defesa costeira. Atualmente, existem dois esporões, denominados esporão norte (Fig.4.3) e esporão sul (Fig.4.4), com cerca de 135 e 130m de comprimento, respetivamente, e várias estruturas longitudinais aderentes (Fig.4.3), das quais uma a sul do esporão sul (Fig.4.5) com 215m de desenvolvimento, uma entre esporões (Fig.4.4) com 550m e uma última que se desenvolve para norte (Fig.4.2). Estas estruturas já sofreram diversas intervenções, nomeadamente os esporões, no que respeita à sua realocização, a operações de manutenção e a intervenções de emergência após fortes temporais, e as estruturas longitudinais aderentes que são frequentemente galgadas.



Fig.4.2 – Estrutura longitudinal aderente que se desenvolve para norte (2015)



Fig.4.3 – Esporão norte (2015)





Fig.4.4 – Esporão sul e estrutura longitudinal aderente entre esporões (Piqueiro, 2015)



Fig.4.5 – Estrutura longitudinal aderente sul (2015)



Para uma análise visual da evolução da linha de costa, num passado recente, apresentam-se, na Fig.4.6, imagens aéreas representativas de vários períodos desde 2003 até 2012.

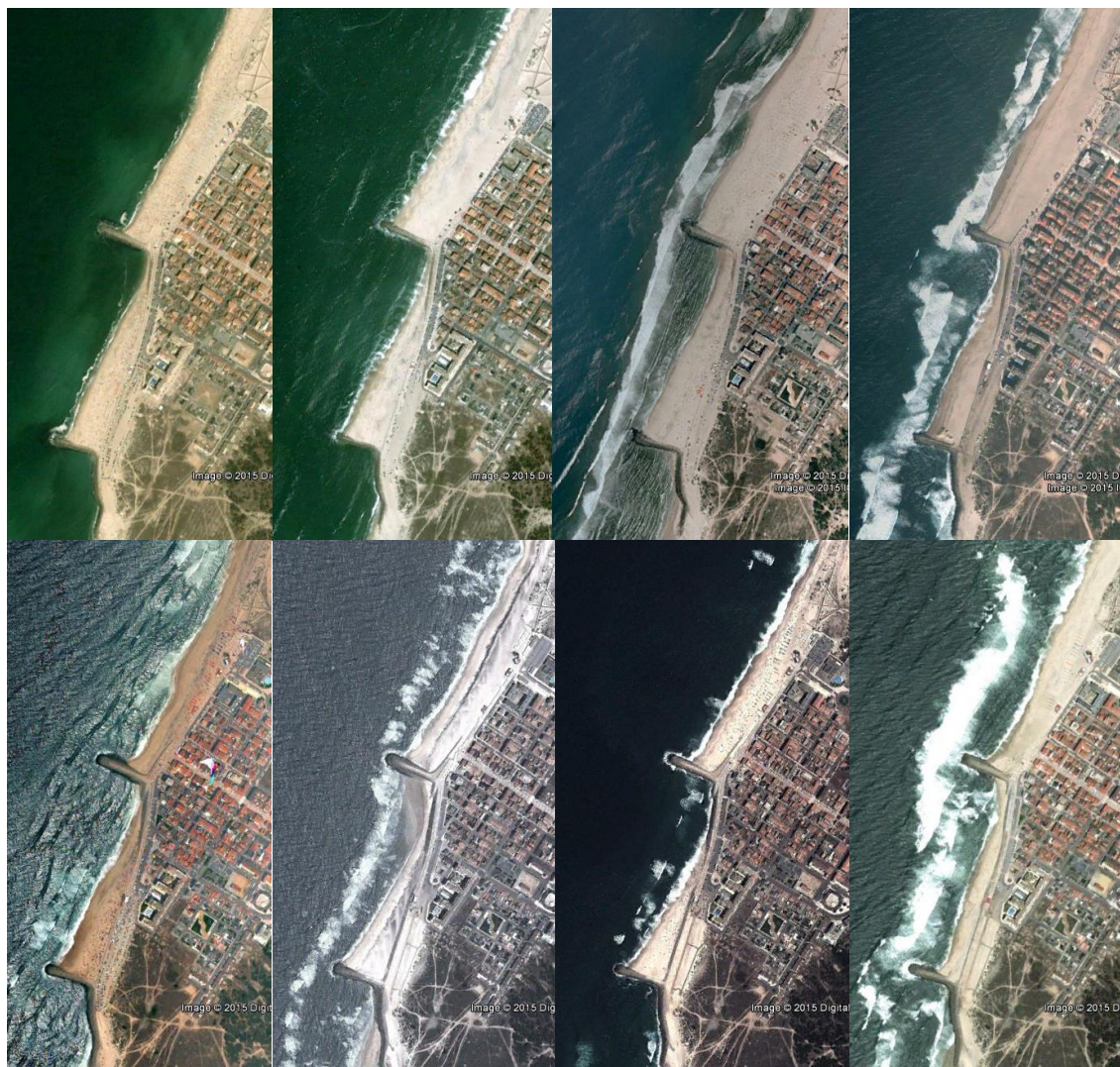


Fig.4.6 – Evolução cronológica da praia do Furadouro – Agosto de 2003, Maio de 2004, Outubro de 2006, Outubro de 2009, Julho de 2010, Junho de 2011, Julho de 2011, Junho de 2012 (da esquerda para a direita) (Google Earth™)

Em todas as imagens, é evidente a acumulação de sedimentos a norte dos esporões e a falta destes a sul, como seria de esperar.

No que diz respeito às zonas a sul dos esporões, que apresentam elevado nível de erosão, verifica-se que, exceto pequenas variações, a situação se mantém relativamente estável.

A norte do esporão sul, a linha de costa permaneceu sem grandes alterações. Apenas em Junho de 2012, é visível que a linha de costa recuou para quase metade da extensão de praia. Esta situação somente se observa num ano, por isso não é possível concluir se se trata de um acontecimento isolado ou se poderá representar uma tendência futura.



À semelhança do acima referido, também a norte do esporão norte se verifica uma grande acumulação de sedimentos. Contudo, enquanto nos anos de 2003, 2004, 2006 e 2009 a situação se mantém aproximadamente estável, no ano de 2010, esta altera-se. Esta mudança surge após terem ocorrido, nesse mesmo ano, dois grandes temporais de sudoeste, direção esta para o qual as praias não estão defendidas (Ramos, 2011). Estes temporais provocaram galgamentos sobre as estruturas longitudinais aderentes, causando grandes danos materiais na marginal e nas próprias estruturas de proteção. Em consequência da grande retirada de sedimentos da praia, provocada pelos referidos temporais, formou-se uma arriba de erosão na praia a norte do esporão norte (Fig.4.7), relativamente próxima da marginal, e verificou-se uma redução substancial da largura dessa mesma praia para cerca de metade face ao ano anterior de 2009. Até ao ano de 2012, é possível observar-se que as consequências dos temporais de 2010 na praia norte, traduzidas por uma redução de sedimentos e consequente recuo da linha de costa, ainda se mantêm.

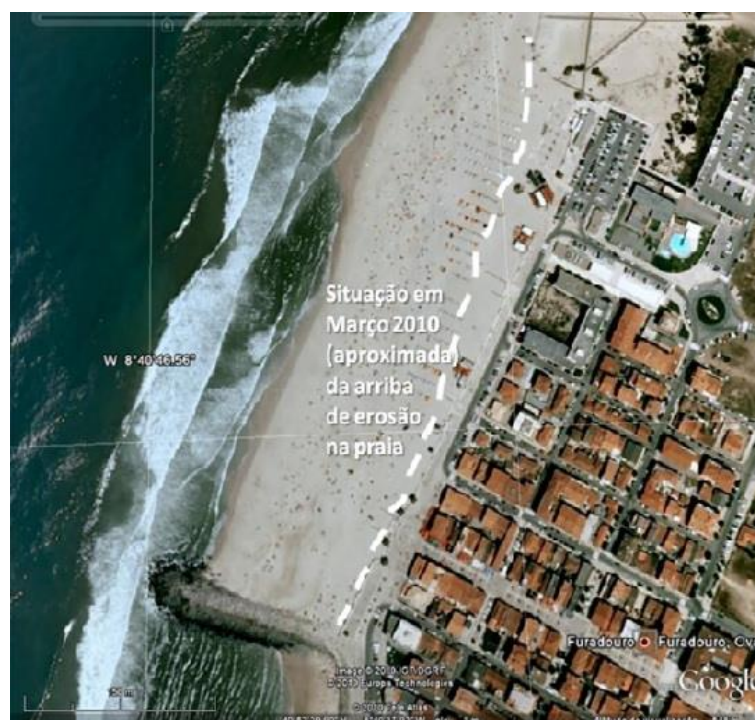


Fig.4.7 – Praia a norte do esporão norte do Furadouro em 2006 e indicação aproximada da arriba de erosão ocorrida em Março de 2010 (Veloso Gomes, 2010)

Apesar da erosão progressiva da praia ao longo dos anos, é perceptível, no local de estudo, uma maior acumulação de sedimentos no presente ano de 2015, testemunhada por quem conhece a zona em questão.

Perante o panorama existente, pode-se afirmar que a zona mais exposta encontra-se entre os dois esporões, principalmente a sul do esporão norte, como se pode constatar na Fig.4.8, caracterizada pela grande pressão urbana e a grande exposição à agitação marítima, devida à quase inexistência de praia nesse local.



Fig.4.8 – Praia do Furadouro – zona entre esporões (Piqueiro, 2015)

## 4.2. CARACTERÍSTICAS DA OBRA EM ESTUDO

### 4.2.1. QUEBRAMAR DESTACADO

A estrutura de defesa costeira em estudo tem como principal objetivo a proteção da frente urbana da praia do Furadouro, sendo que a região entre os esporões, principalmente a sul do esporão norte, representa uma zona de grande exposição que merece especial atenção, como referido anteriormente.

De encontro ao objetivo pretendido, será estudada a implantação de um quebramar destacado e de um sistema de dois quebramares destacados, localizado entre os dois esporões, mais próximo do esporão norte, e paralelo à linha de costa, de forma a atenuar a agitação marítima predominantemente oriunda de Noroeste. A presença do quebramar destacado contribui para a diminuição da altura de onda e favorece a acumulação de sedimentos a sotamar deste, podendo promover a formação de uma saliência ou tómbolo.

A estrutura ficará alinhada com a cabeça do esporão norte e o afastamento entre estruturas é cerca de 60 m. Quanto à definição das dimensões das estruturas destacadas, é atribuído um comprimento de 250 m ao único quebramar destacado e caso sejam dois um comprimento de 150 m para cada um. Em ambos os cenários, a largura do coroamento considerada foi de 20 m.

Importa referir que tanto no que diz respeito às dimensões dos quebramares destacados como à distância à linha de costa e à distância entre estruturas, os valores atribuídos foram arbitrados com base no conhecimento geral e em exemplos semelhantes, visto que para uma definição mais rigorosa desses valores seria necessária a realização do dimensionamento hidráulico e estrutural em consonância com a modelação numérica.

As cotas dos fundos na zona onde se situará a estrutura proposta variam entre -2.5m e -5.5m ao Z.T. (-0.5m e -3.5m ao Z.H.).

#### 4.2.2. AGITAÇÃO MARÍTIMA

Para a modelação do quebramar destacado, é de grande interesse o conhecimento das ações a que a estrutura está sujeita, nomeadamente as relacionadas com o clima de agitação marítima: marés e ondas.

Em relação às características de maré, sabe-se que na costa da zona em estudo estas são do tipo semi-diurno, ou seja, caracterizadas por duas preia-mares e duas baixa-mares, idênticas entre si, por dia lunar, com ciclos de 12h25. Na modelação da estrutura em estudo, serão considerados os registos de níveis de água entre 22 de Março e 20 de Abril de 2015 (Fig.4.9). Devido à disponibilidade de informação relativa a níveis de água de 30 em 30 minutos, os registos usados referem-se à região de Cascais e não à zona em estudo, em que há apenas informação disponível relativa aos níveis de preia-mar e baixa-mar. Como os níveis de água em Cascais são bastante idênticos aos da zona em estudo e o conhecimento exato das horas a que se dão esses níveis não tem importância, visto não estarem a ser analisadas, por exemplo, as fases de construção da obra, não houve qualquer entrave ao uso desta informação.

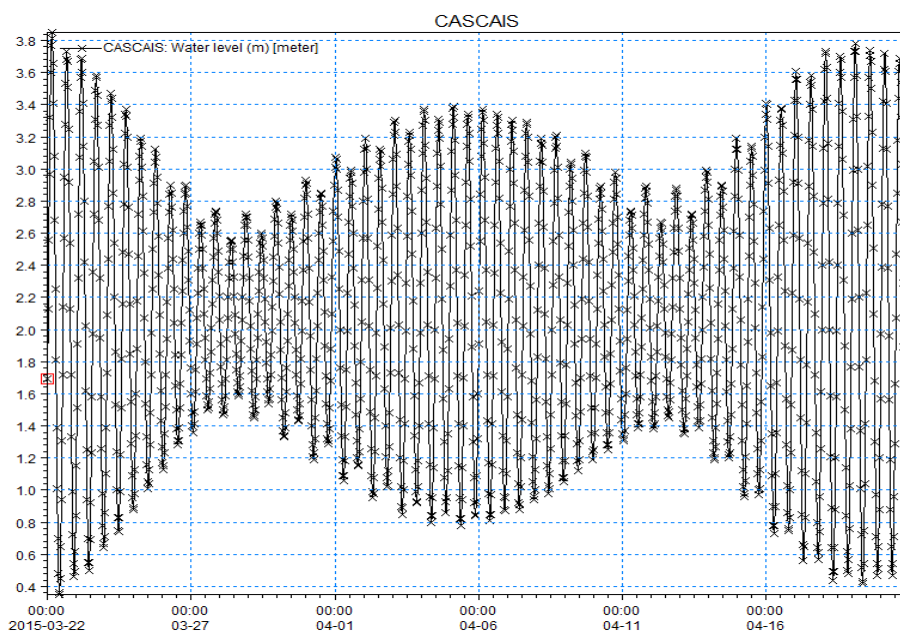


Fig.4.9 – Nível de água em Cascais de 22 de Março a 20 de Abril de 2015

O programa de modelação utilizado considera também a ação vento. Para a contabilização desta ação, foram considerados dados baseados em observações feitas diariamente entre Setembro de 2003 e Março de 2015. As estatísticas de vento realizadas são baseadas em observações reais da estação meteorológica, em Ovar/Maceda. No modelo de simulação, esta ação foi considerada constante, sendo os parâmetros a aplicar os seguintes: velocidade do vento de 4.6 m/s e direção do vento NNO, parâmetros estes baseados nos dados apresentados no Quadro 4.1 e na Fig.4.10.



Quadro 4.1 - Variação mensal da direção e velocidade média do vento  
(<http://pt.windfinder.com/forecast/furadouro>)

Mês do ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Direção do vento	S	N	NNO	NNO	NNO	NNO	NNO	NNO	NNO	S	S	S
Velocidade do vento [m/s]	3.6	4.1	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.1	4.1	3.6	3.6

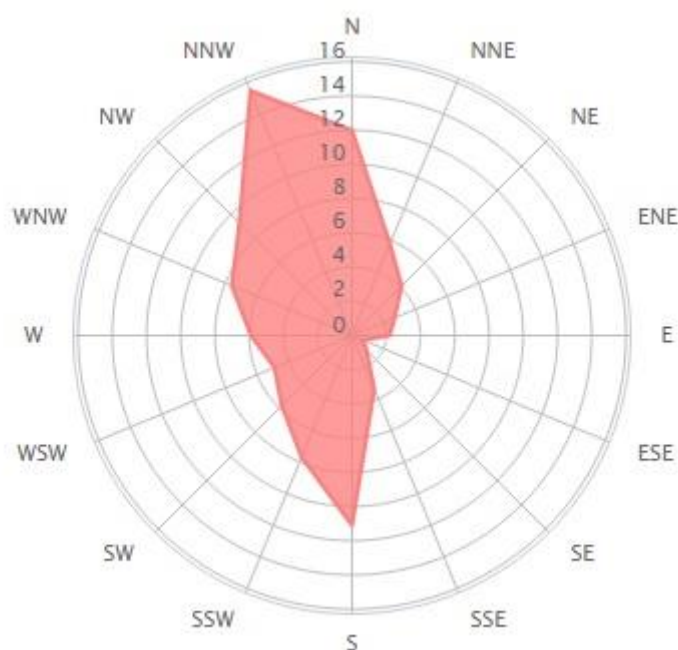


Fig.4.10 – Distribuição anual da direção do vento [%] (<http://pt.windfinder.com/forecast/furadouro>)

Os dados relativos ao clima de agitação marítima da zona baseiam-se no estudo realizado por Costa *et al.* (2001), através de registos feitos na estação da Figueira da Foz, localizada a cerca de 80km da praia do Furadouro.

Na modelação da estrutura, serão consideradas duas situações: condição média e condição de temporal.

As condições médias globais são caracterizadas segundo as distribuições de frequência relativa dos parâmetros altura de onda significativa, período de pico e direção média, desenvolvidas por Costa *et al.* (2001).

No que respeita à altura de onda significativa, os valores mais frequentes situam-se entre 1 e 2m, como se pode observar na Fig.4.11, e a sua média é 2.2m.

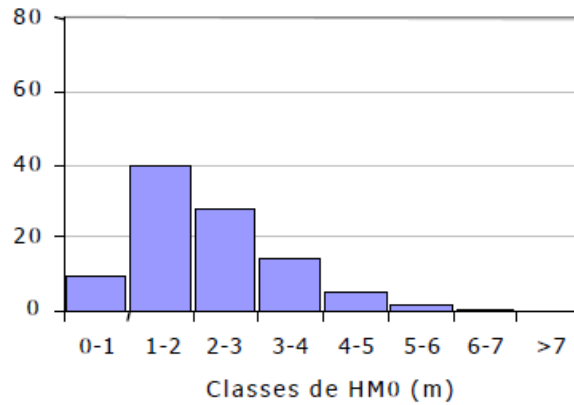


Fig.4.11 – Distribuição de frequência relativa (%) de HM0 (altura significativa) – Figueira da Foz (Costa *et al.*, 2001)

Os valores mais frequentes relativamente ao período de pico situam-se entre 9 e 13s (Fig.4.12), representando 60% dos valores, e a média é 11.4s.

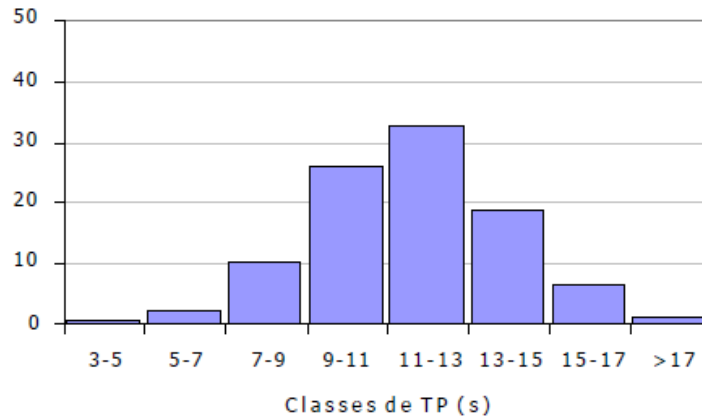


Fig.4.12 – Distribuição de frequência relativa (%) de TP (período de pico) – Figueira da Foz (Costa *et al.*, 2001)

No que se refere à direção média associada ao período de pico, a maior parte das observações situa-se no setor NW (noroeste), como é visível na Fig.4.13.

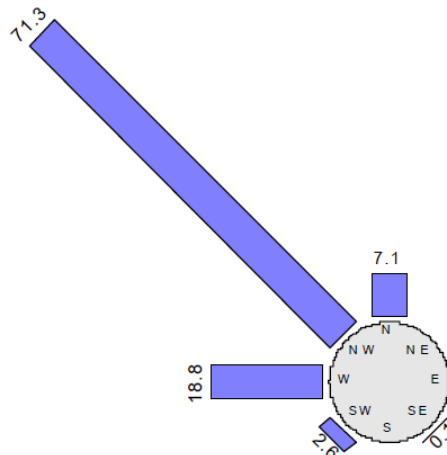


Fig.4.13 – Distribuição de frequência relativa (%) de THTP (direção média) – Figueira da Foz (Costa *et al.*, 2001)

Em suma, o clima de agitação, em condições médias globais, pode ser caracterizado por uma altura de onda significativa média de 2.2m, um período de pico médio de 11.4s e direção média de noroeste.

As condições de temporal, relacionadas com condições extremas de agitação, são de grande importância para o dimensionamento de estruturas costeiras. A caracterização destas condições, mais frequentes no Inverno, é feita segundo Costa *et al.* (2001).

O padrão dominante dos temporais observados é o de noroeste, sendo que o padrão de oeste tem também alguma contribuição (Fig.4.14). A maior percentagem de temporais localiza-se no padrão de noroeste, com altura máxima entre 5 e 7m, não sendo raros os que possam atingir mais de 7m.

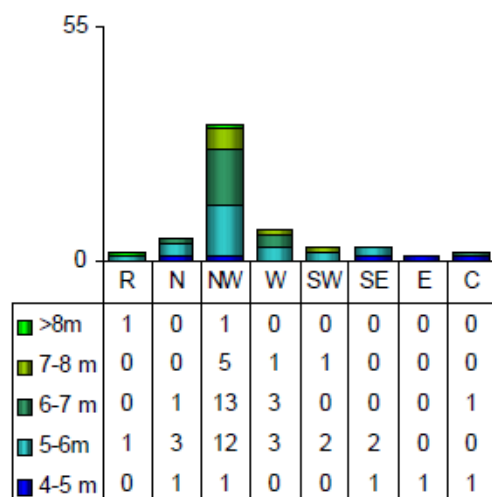


Fig.4.14 – Distribuição conjunta Hmax-orientação – Figueira da Foz (Costa *et al.*, 2001)

Os temporais que persistem por menos de 2 dias refletem 75% das observações. Durações superiores a 2 dias e a 5 dias ocorrem quase unicamente para direções de noroeste (Fig.4.15).

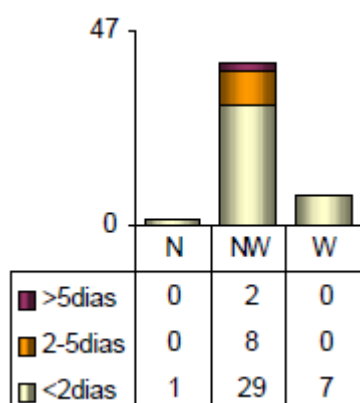


Fig.4.15 – Distribuição conjunta média de THTP-duração – Figueira da Foz (Costa *et al.*, 2001)

Em resumo, as condições de temporal que mais se fazem sentir são provenientes de noroeste com alturas significativas máximas entre 5 e 7m, mas que podem chegar aos 8, durante menos de 2 dias, mas que por vezes persistem mais de 5.

Para além do tipo de temporal referido, proveniente de noroeste, mais frequente e um pouco menos severo, Costa *et al.* (2001) mencionam outro tipo de temporal – temporal de oeste, sendo este mais severo e persistente, mas menos frequente.

Tendo como base a caracterização das condições de temporal realizada, é possível definir uma situação de temporal a considerar: altura de onda significativa de 6m, período de pico de 14s e direção da agitação de oeste.

O Quadro 4.2 resume as duas condições de agitação a aplicar nas simulações do modelo, com base no que foi descrito anteriormente.

Quadro 4.2 – Condições de agitação

Situação	Altura de onda significativa [m]	Período de Pico [s]	Direção
Condição média	2.2	11.4	NO
Condição de temporal	6	14	O

#### 4.2.3. SEDIMENTOS

O conhecimento das características dos sedimentos presentes na zona em estudo é essencial na simulação do modelo, especialmente no que diz respeito à análise do transporte de areia. A modelação no *software* utilizado exige os seguintes dados: diâmetro médio dos grãos, coeficiente de uniformidade e porosidade.

Os diâmetros considerados foram retirados de Silva *et al.* (2009), representativos de um estudo realizado na costa portuguesa entre o porto de Aveiro e a praia de Mira, a uma distância de cerca de 30 km da praia do Furadouro. Os valores observados do tamanho médio dos grãos médios estão dentro da gama de 0.39 e 0.57 mm no local de estudo (Silva *et al.*, 2009). No modelo, o diâmetro médio dos grãos considerado foi de 0.48 mm.

Relativamente ao coeficiente de uniformidade, foi adotado o valor de 1.45, usado noutros exemplos semelhantes para caracterizar a areia da praia.

Na ausência de informação, é usado um valor padrão de 0.40 para a porosidade (Soulsby, 1997).

#### 4.2.4. BATIMETRIA

Dada a falta de levantamentos batimétricos periódicos, utilizam-se muitas vezes dados antigos que não correspondem a situações atuais, prejudicando assim a simulação de modelos das zonas costeiras.

Posto isto, de modo a que o modelo se aproximasse o mais possível da situação atual, procurou-se recorrer aos dados batimétricos mais recentes. Constatou-se que o levantamento batimétrico mais recente da zona em estudo, praia do Furadouro, era referente a 2011.

Esse levantamento corresponde a um Modelo Digital do Terreno, batimétrico (600m de extensão) e topográfico (400m de extensão), das zonas costeiras de Portugal Continental com resolução de 2m, obtido a partir de um levantamento com tecnologia LiDAR – *Light Detection and Ranging* durante o ano de 2011.

A informação referente ao levantamento LiDAR 2011 encontra-se no Sistema de Referência PT-TM06/ETRS89 e a referência vertical é o Datum Altimétrico de Cascais Helmert 38, referindo-se, assim, ao Zero Topográfico, que corresponde aproximadamente ao nível médio da água do mar, e não ao Zero Hidrográfico (Z.H.). A recolha de dados altimétricos de toda a costa portuguesa teve precisamente como objetivo principal o apoio aos trabalhos de elaboração dos Planos de Ordenamento da Orla Costeira, dos Planos de Ordenamento de Estuários e dos Planos de Gestão de Região Hidrográfica.

A área abrangida pelo levantamento LiDAR 2011 que foi alvo de análise no presente trabalho está representada na Fig.4.16, identificando-se facilmente a zona da praia do Furadouro através dos seus esporões.

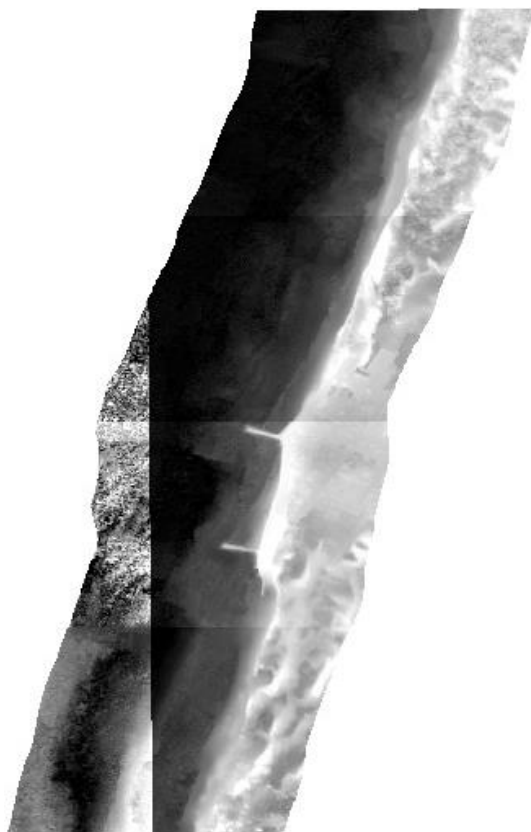


Fig.4.16 – Levantamento LiDAR 2011 - praia do Furadouro (APA, 2011)

No entanto, como foi referido, o levantamento batimétrico apenas se realiza até uma distância de cerca de 600m da linha de costa, correspondendo, na zona em estudo, a uma profundidade de -4 a -5m ao Z.H..

No presente caso, para que o modelo de simulação funcione e obtenha resultados seguros e confiáveis, são necessários dados batimétricos até uma profundidade de, no mínimo, -15m ao Z.H..

De forma a colmatar a falta de informação relativa às zonas de maior profundidade, a solução encontrada passou por adotar a batimetria usada por Ramos (2011), representada na Fig.4.17, tendo sido feita uma interpolação da batimetria, desatualizada e de data desconhecida, para a situação referente a 2011, no âmbito do trabalho «Estudo da Reabilitação de Estruturas de Defesa Costeira – Casos de estudo do Mindelo, Norte do Furadouro e Torreira» (Ramos, 2011).



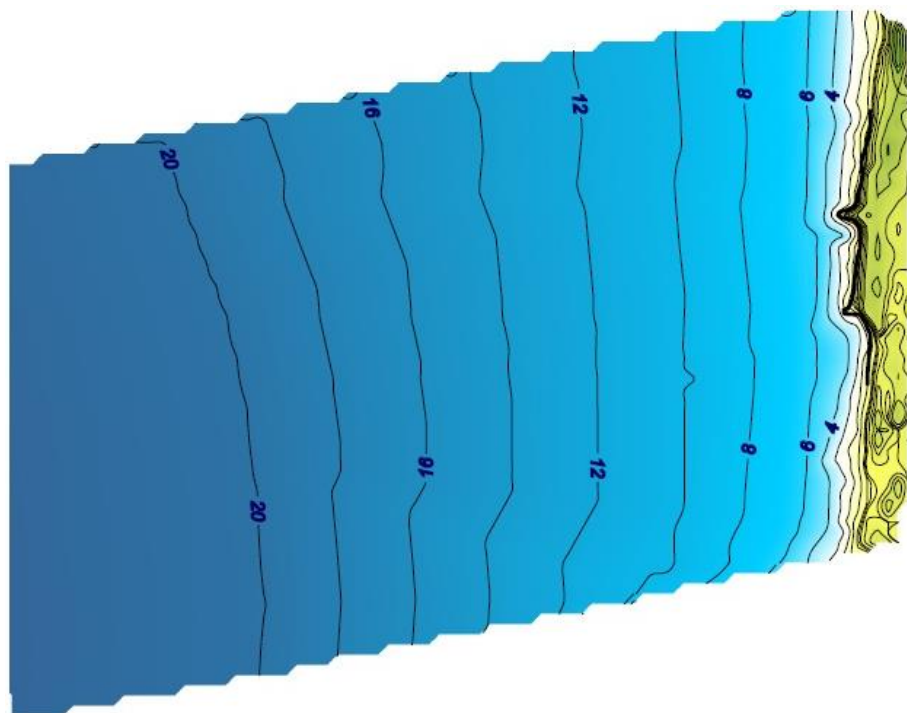


Fig.4.17 – Batimetria modificada, que se admite que seja a mais próxima da realidade no ano de 2011 (Ramos, 2011)

Por coincidência, ambas as fontes de dados se referem ao mesmo ano, 2011. Ainda assim, uma parte dos dados surge de uma aproximação, podendo por isso não haver uma correlação realista entre estes.

Por último, importa referir que a situação atual já não é a mesma da existente aquando do levantamento (2011), demonstrando-se, assim, a facilidade com que os fundos batimétricos junto à costa se alteram, o que justifica, mais uma vez, a necessidade de levantamentos atualizados.



# 5

## SIMULAÇÕES DO CASO DE ESTUDO

### 5.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo, serão apresentados os resultados das simulações do caso de estudo, executadas com o *software MIKE* (sistema *MIKE 21/3 Integrated Models - MIKE 21/3 Coupled Model FM*), tendo por base os capítulos 3 e 4.

O estudo pretende avaliar preliminarmente o impacto de estruturas de defesa costeira destacadas na frente urbana da praia do Furadouro. Inicialmente, será analisada a situação de referência e, posteriormente, estudadas as soluções de um e de dois quebramares destacados. Para cada uma das situações, serão consideradas condições de agitação marítima médias e de temporal, descritas no capítulo 4, totalizando seis possibilidades. De forma a complementar este estudo, será efetuada a simulação de um evento com a duração de duas semanas das três situações supramencionadas, de modo a ser possível avaliar as alterações morfológicas ocorridas nesse período de tempo.

Os resultados a analisar correspondem ao *output* de três módulos do *software* utilizados, *Hydrodynamic Module*, *Spectral Wave Module* e *Sand Transport Module*, em que, devido à grande variedade de parâmetros disponíveis, apenas serão analisados os que se consideram mais relevantes para o estudo em curso. Para além disso, estes resultados são referentes ao instante temporal em que o nível da água corresponde à maior preia-mar dos registos utilizados – 3.85m ao Z.H. (1.85m ao Z.T.), instante este considerado como o mais desfavorável. Por isso, todas as figuras representativas dos *outputs* dos diferentes módulos correspondem ao momento do nível de água referido, excetuando-se as figuras relativas às simulações de duas semanas.

O *software* permite executar simulações 2D e 3D, no entanto, no presente trabalho, apenas foram efetuadas simulações 2D. A simulação 3D tem grande relevância no estudo da variação da temperatura e salinidade, contudo é praticamente irrelevante no estudo dos parâmetros que se pretendem analisar.

Importa também reforçar que, tal como foi explicitado no capítulo 4, referente à batimetria, toda a informação se encontra segundo o zero topográfico, Z.T. (aproximadamente +2m ao zero hidrográfico, Z.H.), nomeadamente o nível médio da água e as cotas dos fundos.

Quanto ao sistema de coordenadas a utilizar, visto que o *software* utilizado não contém o Sistema de Referência PT-TM06/ETRS89, sistema de coordenadas dos dados batimétricos, foi necessária a conversão deste sistema para outro, especificamente para o sistema WGS84, pelo que as coordenadas das figuras apresentadas ao longo do capítulo correspondem a este último sistema. Para o tratamento de todos os dados geográficos foi utilizado o *software* QGIS.

Por último, é importante referir que as figuras serão representadas segundo escalas diferentes consoante a necessidade de analisar uma zona mais específica ou uma área mais abrangente, dado que certos efeitos locais só são legíveis a uma maior escala.

## 5.2. DADOS DE BASE PARA AS SIMULAÇÕES DO CASO DE ESTUDO

Para que seja possível a execução das simulações do modelo, é indispensável a introdução de vários parâmetros de entrada, nomeadamente o ficheiro da malha e batimetria da área em estudo e o ficheiro da série temporal dos níveis de água. O processo para a criação destes ficheiros foi exposto no capítulo 3, utilizando as ferramentas *Mesh Generator* e *Time Series* do *MIKE Zero*.

Antes da malha ser gerada, é necessário definir a fronteira do modelo, Fig.5.1. Para isso, foram introduzidos, inicialmente, os pontos referentes à fronteira terrestre, representativos da linha da marginal. A fronteira não representa a linha de costa, porque o *software* considera as fronteiras como sendo sólidas, ou seja, que não sofrem alterações, e de altura infinita. Por isso, ao considerar a linha de costa como uma fronteira sólida, esta não sofreria qualquer alteração, funcionando como uma parede vertical. Também no que se refere aos esporões existentes, estes foram delimitados pela sua largura de coroamento de forma a não representarem estruturas com uma largura maior do que na realidade. Neste âmbito, é oportuno referir que os quebramares destacados serão definidos como fronteiras sólidas e, por isso, funcionarão como paredes verticais, sem qualquer rugosidade definida, de altura infinita, o que se traduz na não consideração de possíveis galgamentos.

De seguida, foram definidas as fronteiras abertas segundo o comprimento que se pretendia estudar, tanto na direção longitudinal da costa, definido pela extensão da batimetria disponibilizada, cerca de 4km, como na direção *offshore*, cerca de 2.5 km, cujo comprimento nesta direção deveria ser tal que fosse possível estudar um modelo até fundos de -15m ao Z.H., condição para que o modelo funcionasse satisfatoriamente.

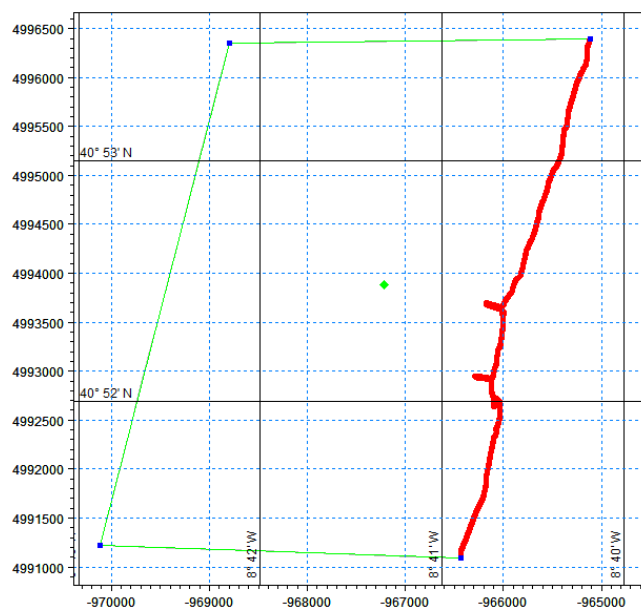


Fig.5.1 – Fronteira do modelo

Após a fronteira do modelo estar concluída, foi possível gerar uma malha triangular, independente da profundidade, através da definição dos parâmetros referenciados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Opções da malha triangular

Máxima área do elemento [m <sup>2</sup> ]	Menor ângulo admitido [°]	Máximo número de nós
100 000	20	6 000

A definição dos parâmetros esteve, essencialmente, dependente de problemas relacionados com o número CFL na execução das simulações. Como mencionado no capítulo 3, este número tem que ser menor que 1 e, quando tal não acontece, a solução pode passar por alterar as definições da malha, tornando-a mais “grosseira”, ou diminuir o intervalo de tempo por forma a que o critério supracitado seja cumprido. Visto um intervalo de tempo menor traduzir-se numa duração de simulação superior, optou-se por alterar as definições da malha.

Para o efeito, a máxima área do elemento teve que ser aumentada e o menor ângulo admitido diminuído. O aumento da máxima área conduziu ao aumento da área de alguns elementos provocando a diminuição da precisão, enquanto que a redução do menor ângulo admitido, isto é, o aumento da assimetria dos triângulos, provocou alterações maioritariamente nas zonas onde a malha é mais densa, reduzindo a precisão nessas mesmas zonas.

Por fim, procurou-se suavizar a malha gerada, reduzindo as diferenças de área e ângulos entre elementos vizinhos, ou seja, os elementos são homogeneizados, tornando a malha mais homogênea.

Na Fig.5.2, está representada a malha final para a situação de referência. A malha, definida automaticamente, sendo apenas necessário definir os parâmetros referidos acima, é mais densa junto das fronteiras, aumentando assim a precisão de estudo nesses locais. Aquando da introdução dos quebramares destacados, a malha sofrerá ligeiras alterações, tornando-se mais densa em torno destes, como se pode constatar nas figuras 5.3 e 5.4.

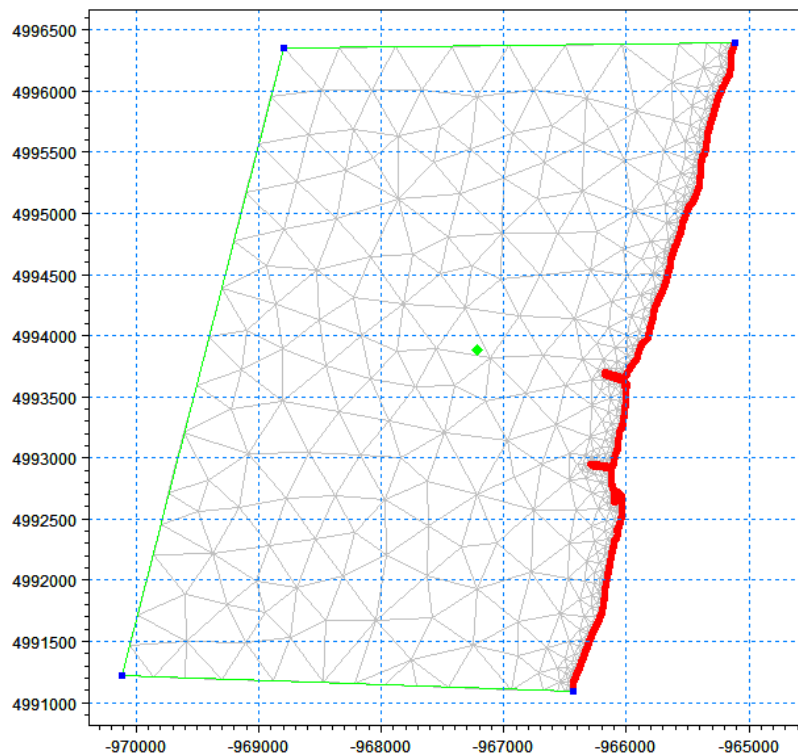


Fig.5.2 – Fronteira e malha do modelo para a situação de referência

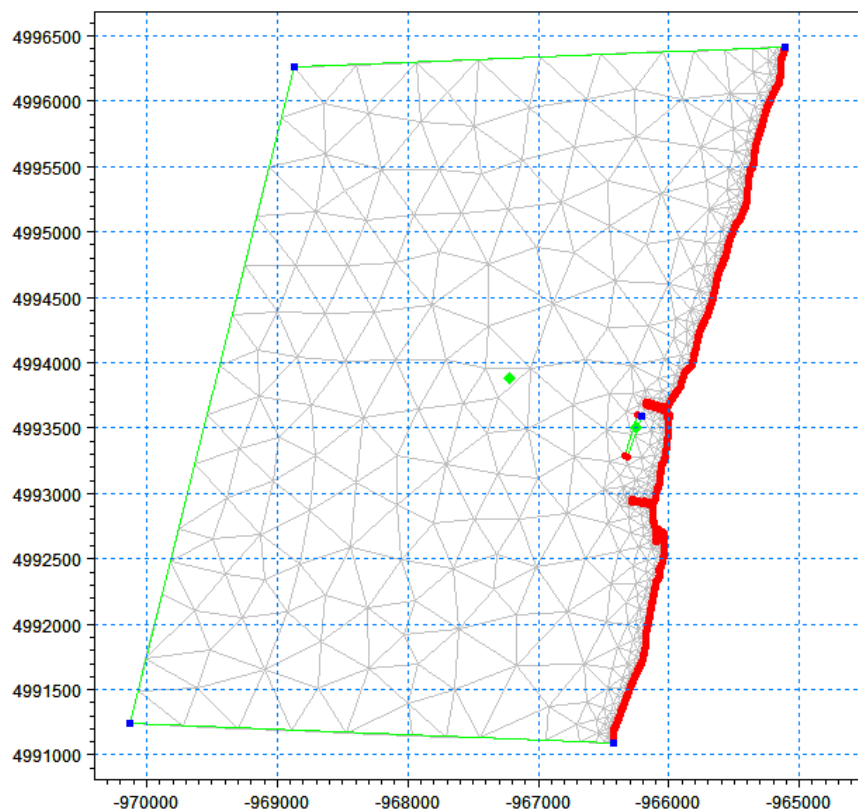


Fig.5.3 – Fronteira e malha do modelo para a situação de um quebramar destacado

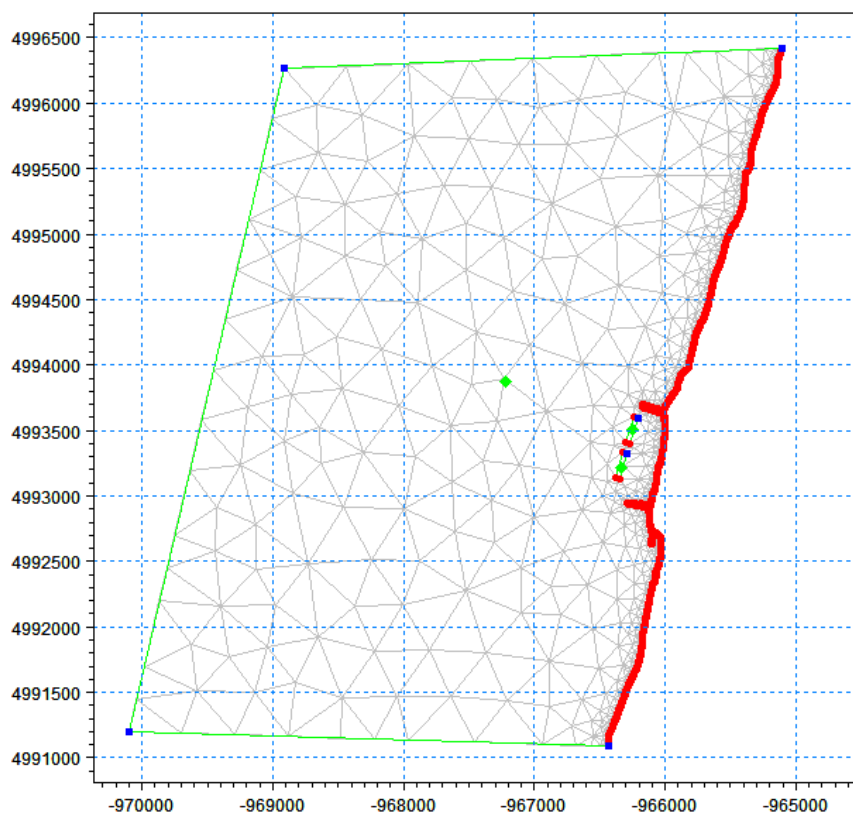


Fig.5.4 – Fronteira e malha do modelo para a situação de dois quebramares destacados

Por último, foi introduzida toda a informação batimétrica correspondente e exportou-se o ficheiro da batimetria, exibido na Fig.5.5.

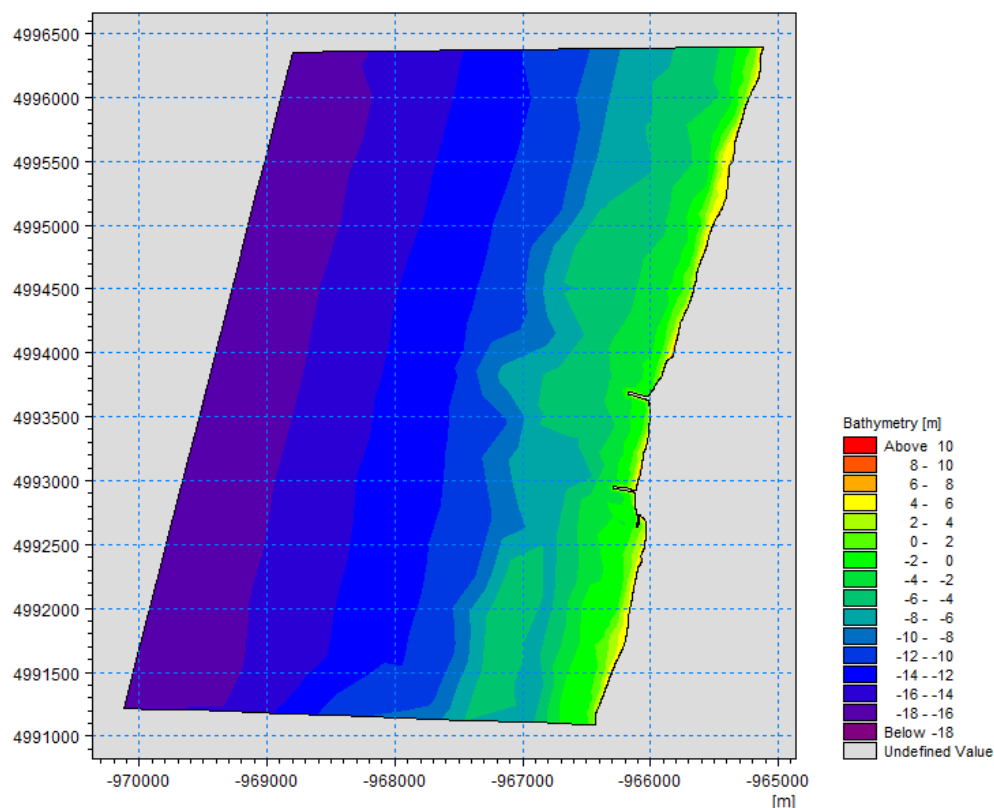


Fig.5.5 – Batimetria usada do modelo numérico

Caso se pretenda um nível de água variável, o modelo exige a introdução de um ficheiro de uma série temporal com os níveis de água respetivos. Os dados considerados foram especificados no capítulo 4 e estão representados, graficamente, na Fig.5.6.

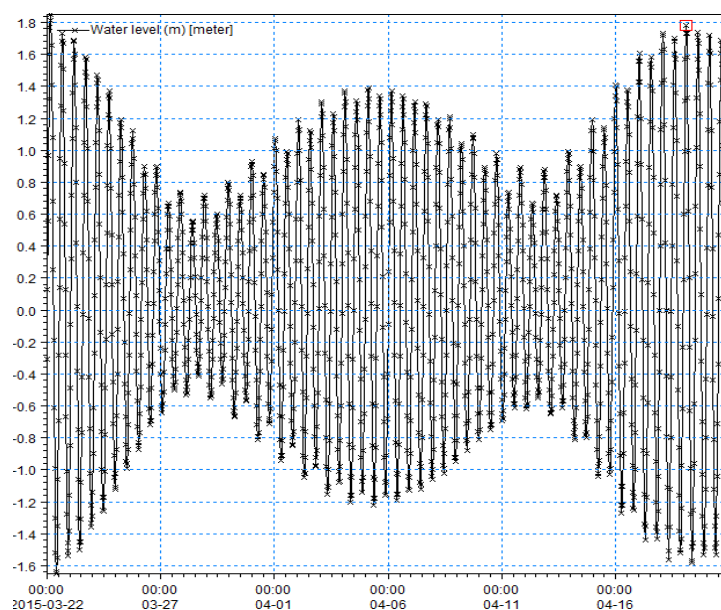


Fig.5.6 – Série temporal dos níveis de água, em relação ao Z.T.

Após a introdução dos ficheiros da malha e da série temporal, é necessária a definição de muitos outros parâmetros, expostos no capítulo 3, para cada um dos módulos, de modo a executar a simulação do modelo pretendido. Inicialmente, foram definidos os parâmetros para o *Hydrodynamic Module*, apresentados em resumo no Quadro 5.2, dos quais não foram considerados: correção de profundidade, cobertura de gelo, potencial de maré, precipitação, evaporação e fontes.

Quadro 5.2 – Parâmetros considerados no *Hydrodynamic Module*

Parâmetros	Parâmetros considerados
Integração no tempo	Esquema de ordem inferior
Discretização do espaço	
Zonas secas e inundadas	Profundidade de zona seca=0.005m
	Profundidade inundada=0.05m
	Profundidade húmida=0.1m
Densidade	Barotrópica
Viscosidade turbulenta horizontal	Formulação de Smagorinsky: valor constante=0.28
Resistência do leito	Número de Manning = $32\text{m}^{1/3}/\text{s}$
Força de Coriolis	Variável no domínio
Ação do vento	Velocidade=4.6m/s; Direção NNO (constante)
Radiação de onda	Radiação de onda segundo a simulação SW
Condições de fronteira	Fronteira terrestre: Terra
	Fronteiras abertas: Nível de água variável no tempo, constante ao longo da fronteira

Apesar de ser menos preciso, optou-se tanto para o regime de integração no tempo como para a discretização do espaço por um esquema de ordem inferior pois é computacionalmente mais rápido. Os dados relativos à ação do vento foram referidos no Capítulo 4.

No Quadro 5.3, apresentam-se os parâmetros definidos relativos ao *Spectral Wave Module*.



Quadro 5.3 – Parâmetros considerados no *Spectral Wave Module*

Parâmetros	Parâmetros considerados
Formulação espectral	Formulação paramétrica de dissociação direcional
Formulação de tempo	Formulação quase-estacionária
Condições do nível da água	Variação do nível da água segundo a simulação HD
Condições de corrente	Variação da corrente segundo a simulação HD
Ação do vento	Velocidade=4.6m/s; Direção NNO (constante)
Rebentação da onda	Parâmetro de rebentação=0.8
Atrito do fundo	Rugosidade de Nikuradse: $k_n=0.01m$
Condições iniciais	Fórmula empírica da expressão de crescimento do fetch de JONSWAP
Condições de fronteira	Fronteira aberta, oeste: Parâmetros de onda constantes (altura de onda significativa, período de onda de pico e direção de onda média) Fronteira aberta, norte e sul: Fronteira lateral

Tal como no módulo anterior, as opções tomadas relativamente às formulações espectral e de tempo correspondem a formulações computacionalmente menos exigentes.

Quanto ao módulo *Sand Transport Module*, os parâmetros definidos estão expostos no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Parâmetros considerados no *Sand Transport Module*

Parâmetros	Parâmetros considerados
Tipo de modelo	Onda e corrente
Propriedades dos sedimentos	Porosidade=0.4; diâmetro do grão=0.48mm; coeficiente de uniformidade=1.45
Ações – Ondas	Campo de onda segundo a simulação SW
<i>Morphology Module:</i>	
Alteração do nível do fundo máxima	2 m/dia
Condições de fronteira	Fronteiras abertas: Gradiente do fluxo de sedimentos de saída nulo; Alteração dos fundos de entrada nula

Algumas das opções acima tomadas, para os diferentes módulos, foram baseadas em exemplos que se assemelham ao caso de estudo, pelo que se admite que a parametrização e os resultados sustentados na mesma podem ser considerados fidedignos.

### 5.3. SIMULAÇÕES DO CASO DE ESTUDO

#### 5.3.1. SIMULAÇÃO DA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA

Nesta primeira simulação, pretende-se analisar os resultados obtidos para a situação de referência, ou seja, a situação atual do caso de estudo com a batimetria base e as estruturas de defesa costeira já existentes.

Para isso, serão testadas duas condições de agitação marítima, média e de temporal, sendo que a primeira diz respeito às condições de agitação médias: altura significativa de 2.2m, período de pico de 11.4s e direção de noroeste.

Os primeiros resultados a analisar correspondem ao *Hydrodynamic Module*, em que serão avaliados os parâmetros que se consideram mais relevantes para o estudo em curso, dos quais fazem parte: nível médio da água, representado seguidamente na Fig.5.7, e velocidade da corrente, cujos valores correspondem aos valores médios em profundidade.

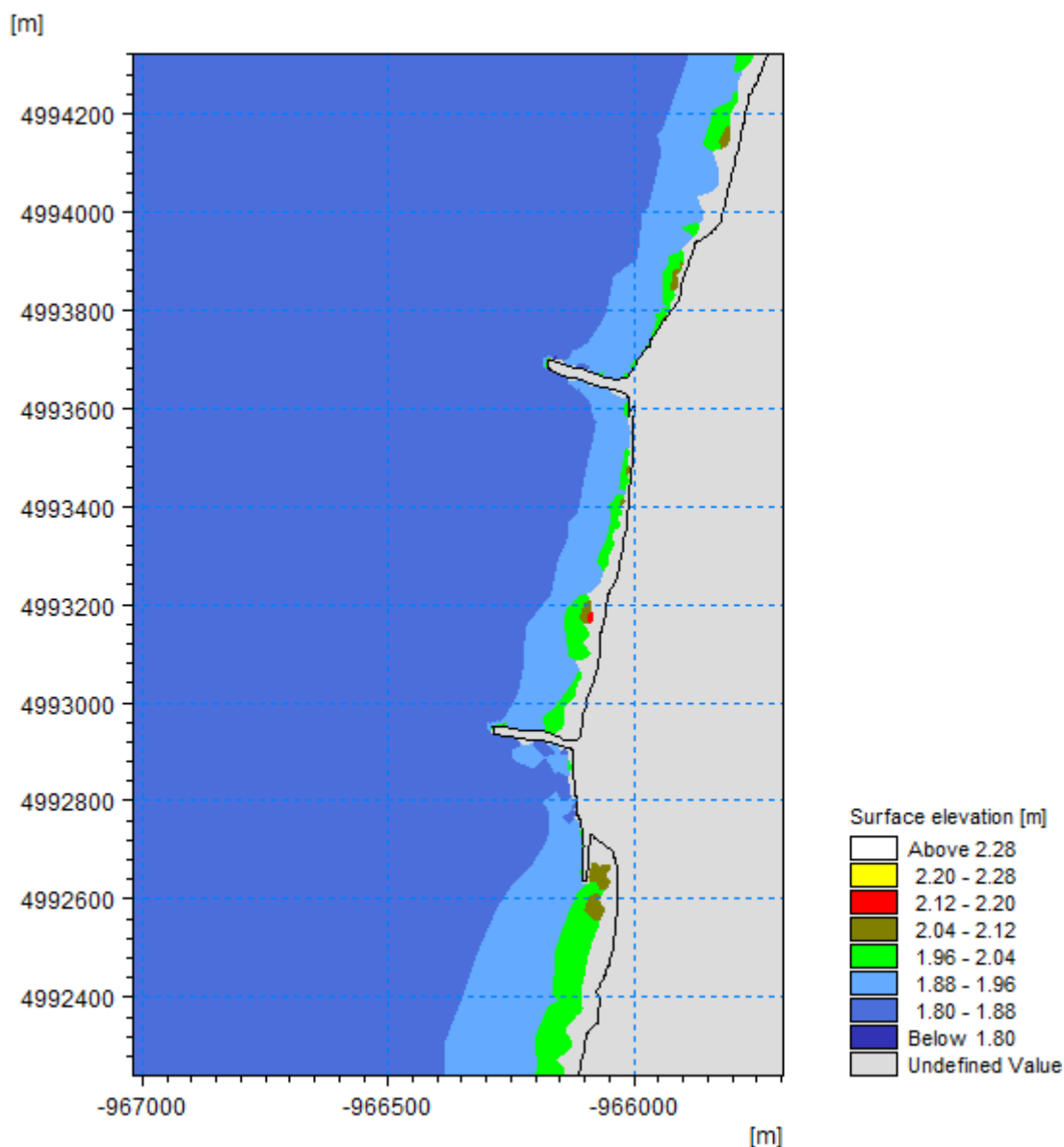


Fig.5.7 – Nível médio da água, em relação ao Z.T. (Hs=2.2m; Tp=11.4s; Noroeste)

Em grande parte do modelo, o nível médio da água é aproximadamente constante, correspondendo ao nível introduzido – 1.85m ao Z.T.. No entanto, à medida que se aproxima da costa, esse nível aumenta até cerca de 2m ao Z.T.. O fenómeno designado por *wave setup*, aumento do nível da água devido à presença de ondas, justifica este facto.

Na Fig.5.8, estão representados a velocidade da corrente, aproximadamente constante ao largo mas que se altera junto à costa, e os vetores respetivos.

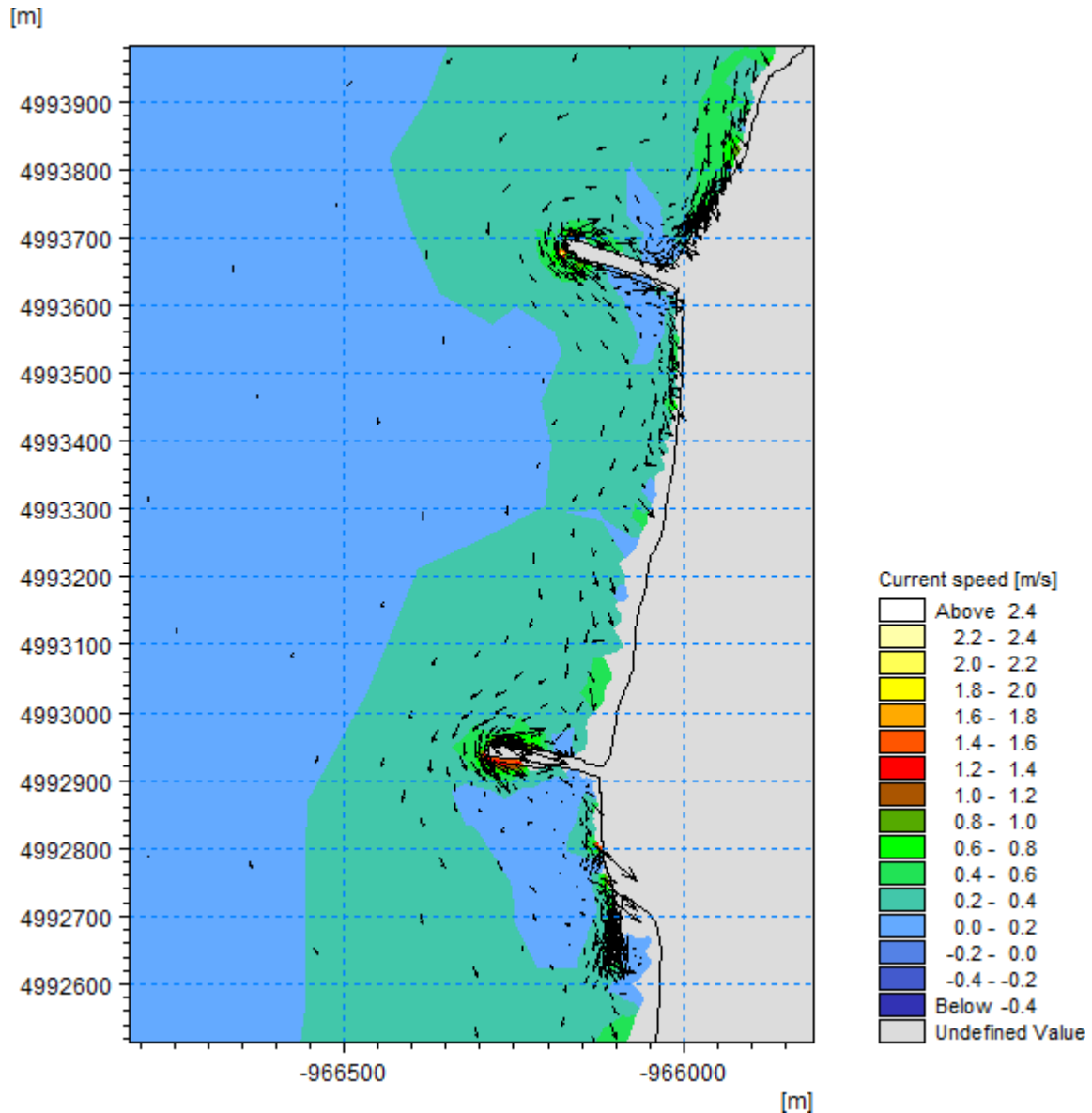


Fig.5.8 – Velocidade da corrente e respetivos vetores ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

Na Fig.5.8, observa-se que, junto à linha de costa, as velocidades da corrente aumentam, assumindo um valor relativamente constante, exceto em certos locais.

No geral, os vetores velocidade têm sentido de norte para sul, exceto junto aos esporões, onde os vetores assumem direções e sentidos diferentes, pois tendem a contorná-los.

A maior densidade de vetores em certos pontos prende-se com o facto da malha nesses locais ser mais densa, condição esta aplicável para todas as representações de vetores aplicadas no desenvolvimento deste trabalho.

Em certas zonas, como a barlamar do esporão norte, na estrutura longitudinal aderente sul e principalmente na cabeça de ambos os esporões, a velocidade da corrente é superior e há uma grande variação da sua direção e sentido, sendo que junto aos esporões se criam, por vezes, correntes de sentido circular.

A sul dos esporões, consegue-se ter a percepção da definição de correntes de difração, embora este efeito seja menos notório a sul do esporão sul. Ainda nesta região, é visível alguma influência dos esporões na proteção a sul destes, principalmente a sotamar do esporão sul, devido à diminuição da velocidade da corrente nessas regiões.

Seguidamente, são analisados os resultados provenientes do módulo relativo ao estudo das ondas, *Spectral Wave Module*, cujos *outputs* analisados são: altura de onda significativa e máxima, período de onda de pico, direção de onda média e potência da onda.

Na Fig.5.9, apresenta-se a variação da altura de onda significativa, um dos parâmetros fundamentais no estudo das ondas, juntamente com os vetores representativos da direção das ondas.

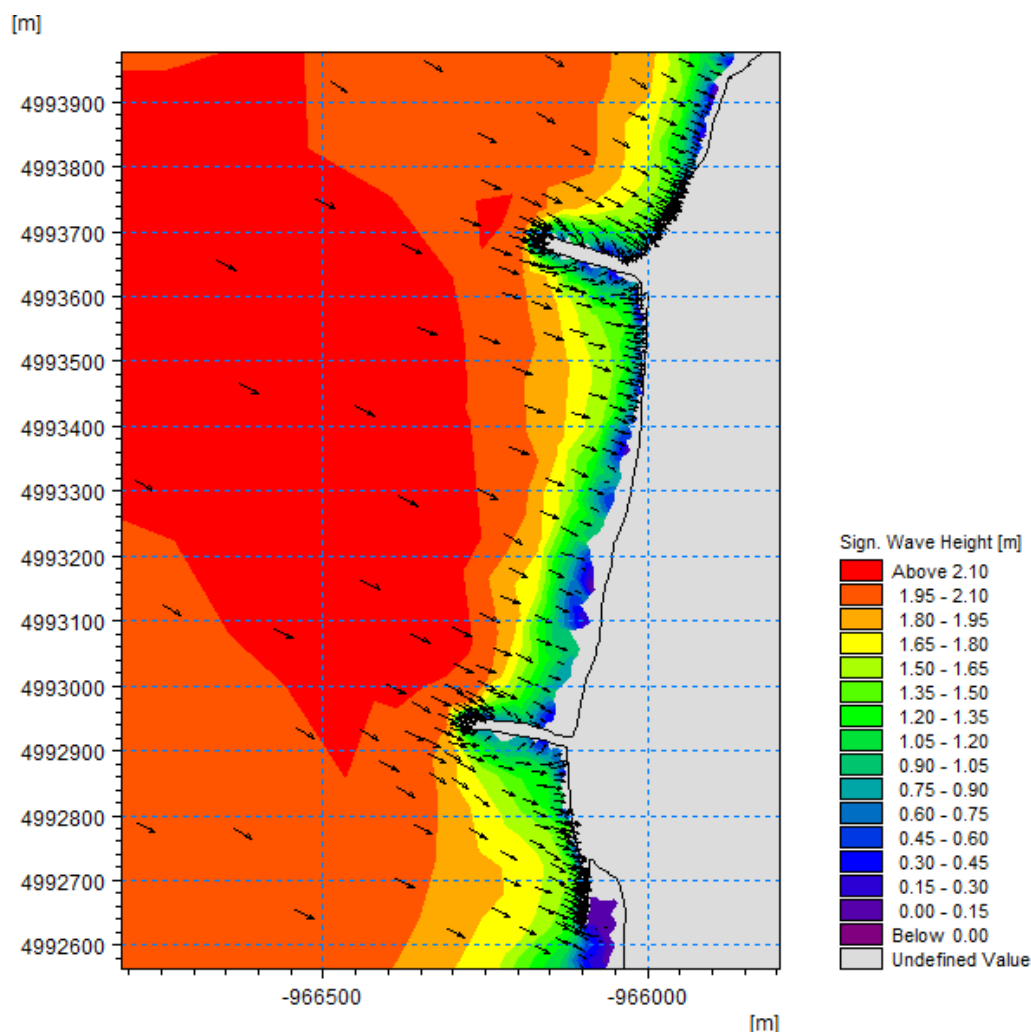


Fig.5.9 – Altura de onda significativa e vetores representativos da direção da onda ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

Na Fig.5.9, é possível observar que a altura de onda varia entre 2.0 e 2.2m em grande parte da área do modelo, mas próximo da costa esta diminui gradualmente até atingir o valor nulo – rebentação da onda. Os esporões são atingidos por ondas com altura significativa de cerca de 1.80m. Algumas variações da altura de onda observadas ao largo podem dever-se a efeitos causados por certas irregularidades de batimetria. Junto à linha de costa, são detetados efeitos de refração, em que, devido à irregularidade dos fundos, as cristas das ondas deformam-se ao aproximarem-se da linha de costa e tendem a ficar paralelas às curvas batimétricas.

As zonas a destacar são os esporões e a estrutura longitudinal aderente sul, atingidas por alturas de onda superiores, e as regiões a norte e a sul do esporão norte, onde as ondas atingem a marginal, rebentando junto desta.

No que diz respeito à direção dos vetores, observa-se que esta corresponde aproximadamente à direção de noroeste, previamente introduzida, no entanto, a sul dos esporões, são visíveis efeitos de difração.

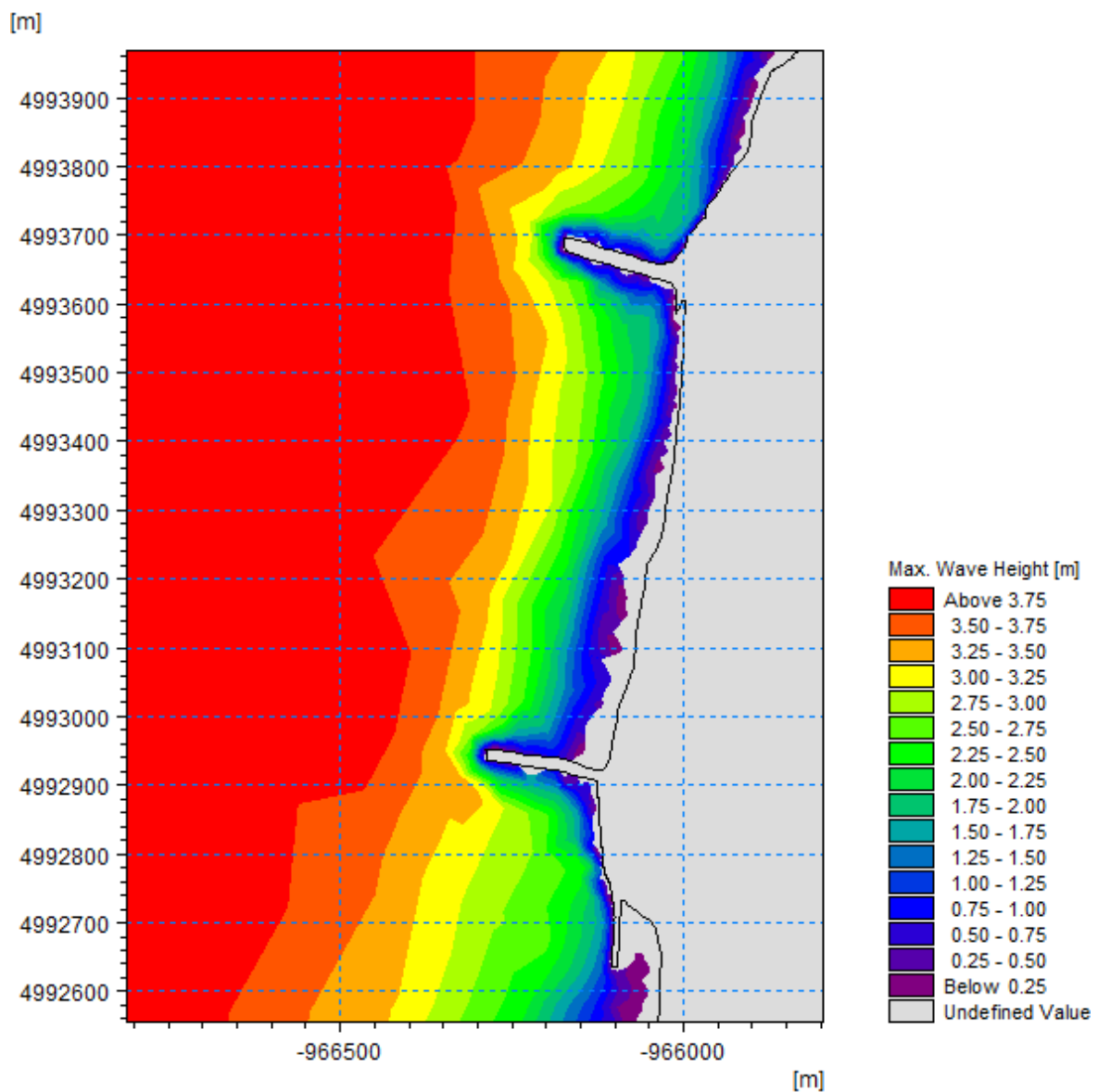


Fig.5.10 – Altura de onda máxima ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

A altura de onda máxima (Fig.5.10) tem aproximadamente a mesma variação que a altura de onda significativa, apenas os valores, como é de prever, são maiores. Enquanto ao largo a altura é de aproximadamente 4m, na proximidade da costa estes valores começam a diminuir, atingindo os esporões com uma altura de quase 3m. O valor da altura de onda máxima ao largo, 4m, pode ser validado pela relação entre a altura de onda máxima e a altura de onda significativa ser aproximadamente igual ao valor padrão de 1.8 ( $H_{max}/H_s=4/2.2\sim 1.8$ ). Os efeitos de refração são, também neste caso, claramente visíveis, dado que junto à costa as cristas das ondas tendem a ficar paralelas às curvas batimétricas.

A variação do período de onda, nomeadamente o período de onda de pico, Fig.5.11, é outra característica da onda que foi analisada.

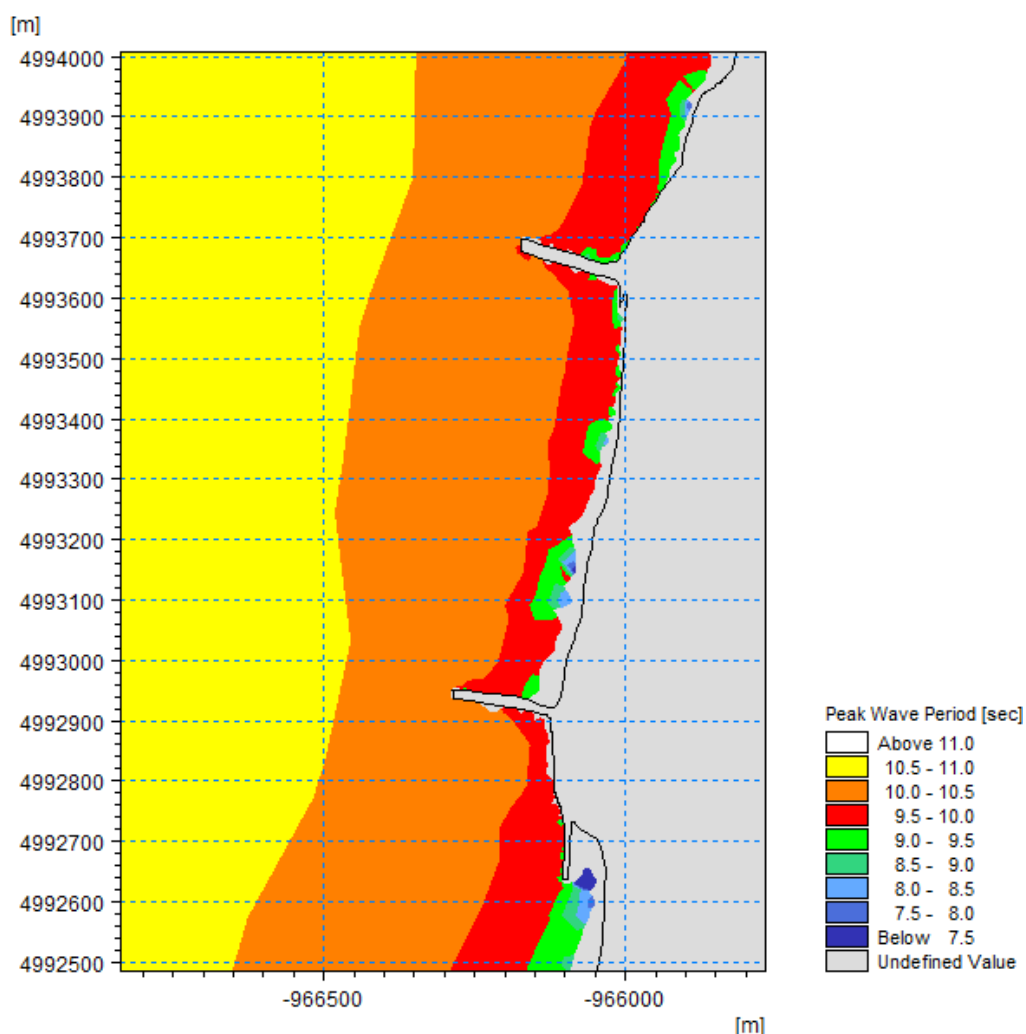


Fig.5.11 – Período da onda de pico ( $H_s=2.2m$ ;  $T_p=11.4s$ ; Noroeste)

O período da onda de pico diminui de forma ligeira à medida que se aproxima da linha de costa, começando com um valor próximo do valor introduzido, 11.4s, e decrescendo para cerca de 9.5s.

Outro parâmetro importante e que pode vir a completar as conclusões tiradas para os vetores representativos da direção das ondas é a direção média da onda (Fig.5.12).

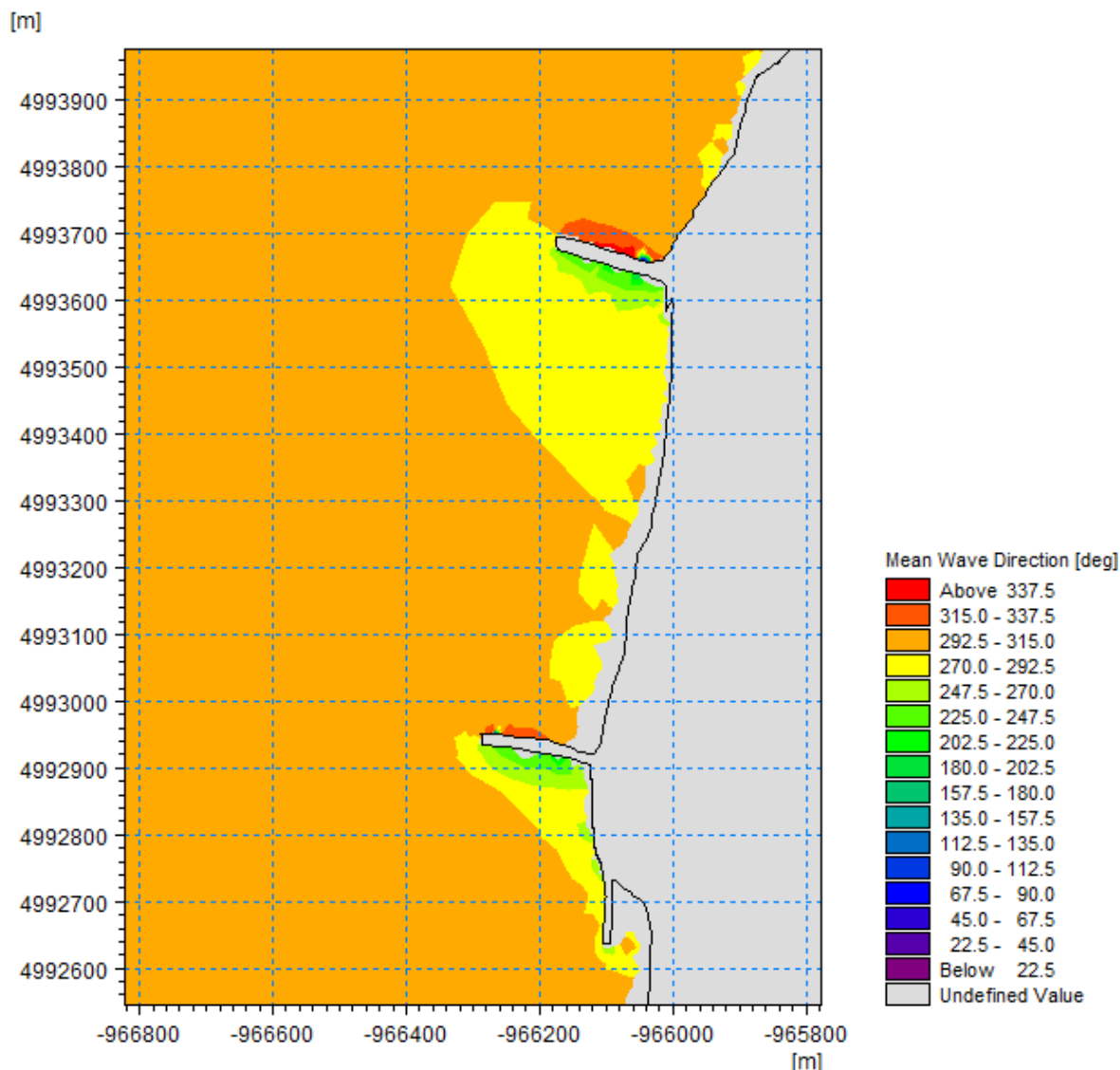


Fig.5.12 – Direção média da onda (Hs=2.2m; Tp=11.4s; Noroeste)

Ao largo, a direção média da onda assume valores entre 292.5° e 315°, intervalo este onde se encontra o valor de 315°, correspondente ao dado da direção inserido. Quando a distância à costa começa a diminuir, este valor diminui, nalgumas regiões, para 270-292.5°, ou seja, a direção aproxima-se da direção oeste (270°). Este fenómeno deve-se aos efeitos de refração, em que a direção da onda tende a ficar ortogonal às curvas batimétricas.

Em torno dos esporões, são facilmente detetáveis dissemelhanças. A barlamar dos esporões a direção aproxima-se do norte (315-337.5°) devido a efeitos de refração. O contrário acontece a sotamar dos esporões, em que a direção varia entre 225 e 270°, ou seja, direções entre sudoeste e oeste, devido aos efeitos de difração que aí ocorrem.

A avaliação da potência da onda incidente (Fig.5.13) pode também contribuir para o estudo do comportamento dinâmico da zona em estudo.

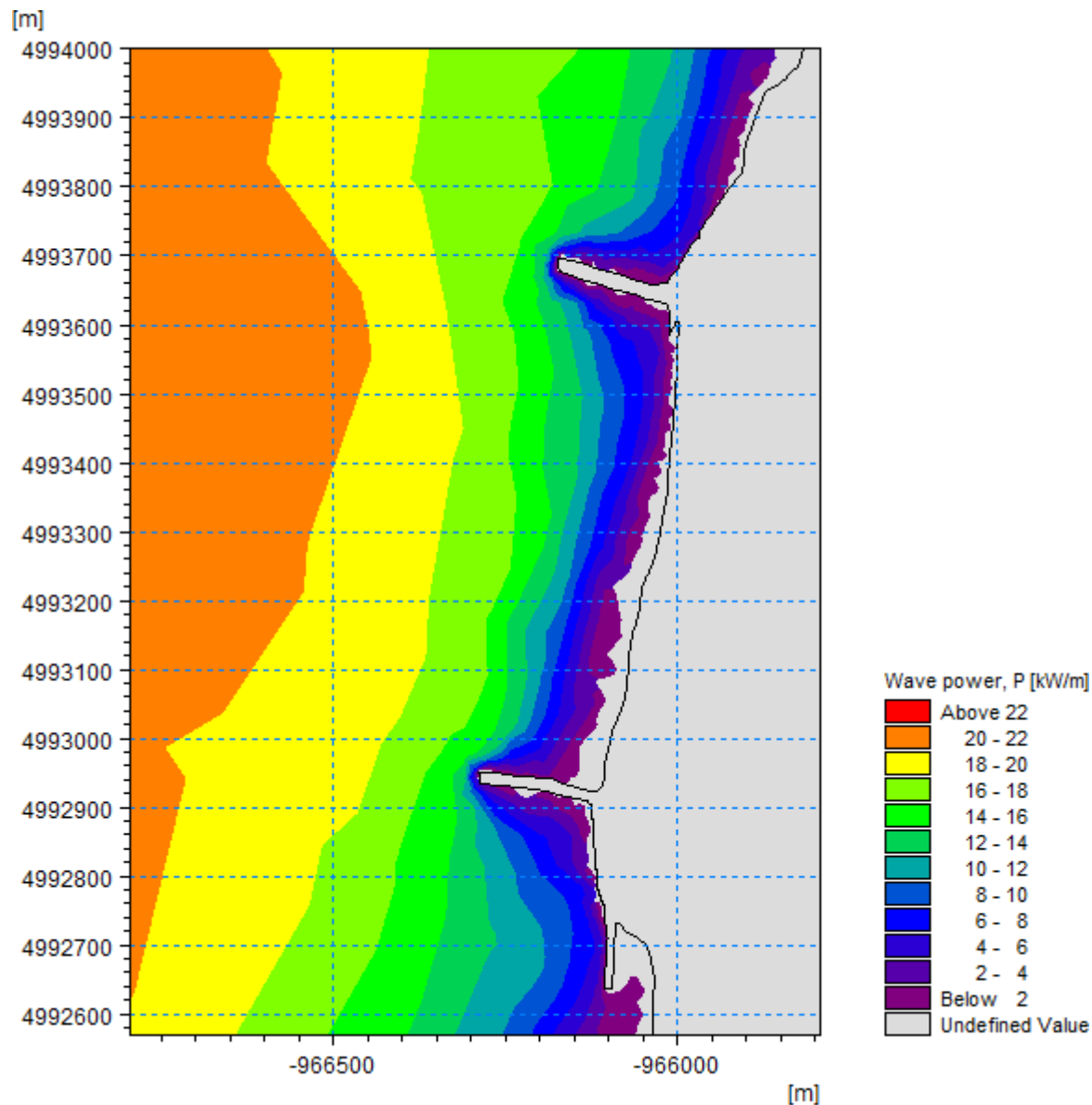


Fig.5.13 – Potência da onda ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

Como era expectável, é notória a diminuição desde o largo até à linha de costa da potência da onda. A potência é proporcional à energia, sendo que o termo energia de onda é também frequentemente usado. Importa referenciar a zona a barlar do esporão norte, a cabeça dos esporões e a estrutura longitudinal aderente sul, pois são zonas de maior concentração de energia.

O último módulo a analisar é o *Sand Transport Module*, que fornece resultados relacionados com o caudal sólido transportado e a alteração do nível dos fundos.

Na Fig.5.14, representa-se a variação do caudal sólido transportado ao longo da linha de costa.



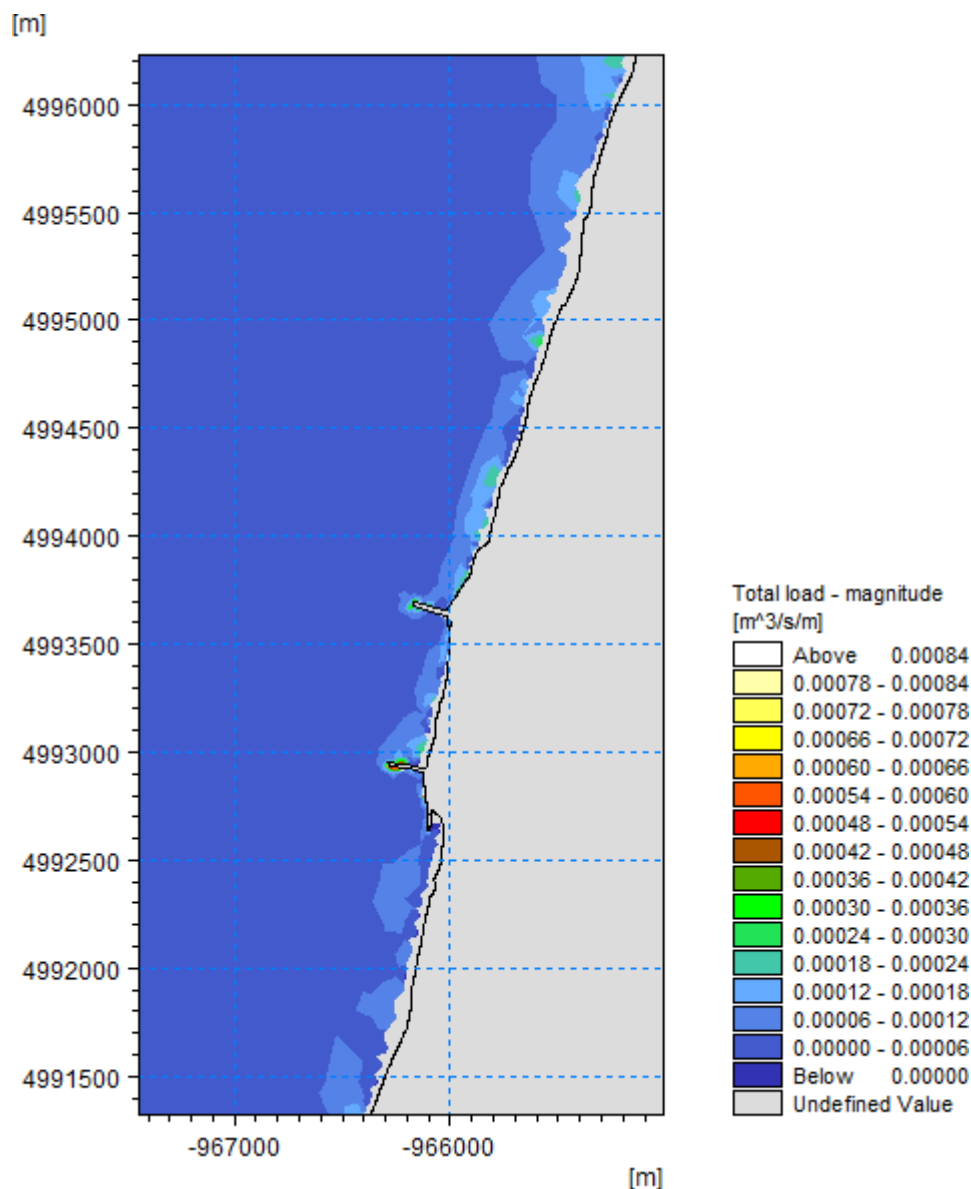


Fig.5.14 – Caudal sólido transportado (Hs=2.2m; Tp=11.4s; Noroeste)

Numa visão global ao longo da linha de costa, tem-se a percepção que o caudal sólido transportado é maior a norte da praia do Furadouro, o que pode significar que a existência dos esporões pode estar de certa forma a afetar o transporte de sedimentos para sul.

Mais em detalhe, verifica-se claramente que o caudal sólido transportado é maior a norte dos esporões e menor a sul destes, como se previa. O sentido segundo o qual se dá o transporte do caudal sólido é, no geral, de norte para sul. Os vetores que permitem concluir acerca do sentido do transporte não são aqui expostos pois não são de fácil percepção, mas foram observados no *software*.

A taxa de alteração do nível dos fundos, expressa em m/dia na Fig.5.15, é um bom indicador no que diz respeito a fenómenos de acreção e erosão.

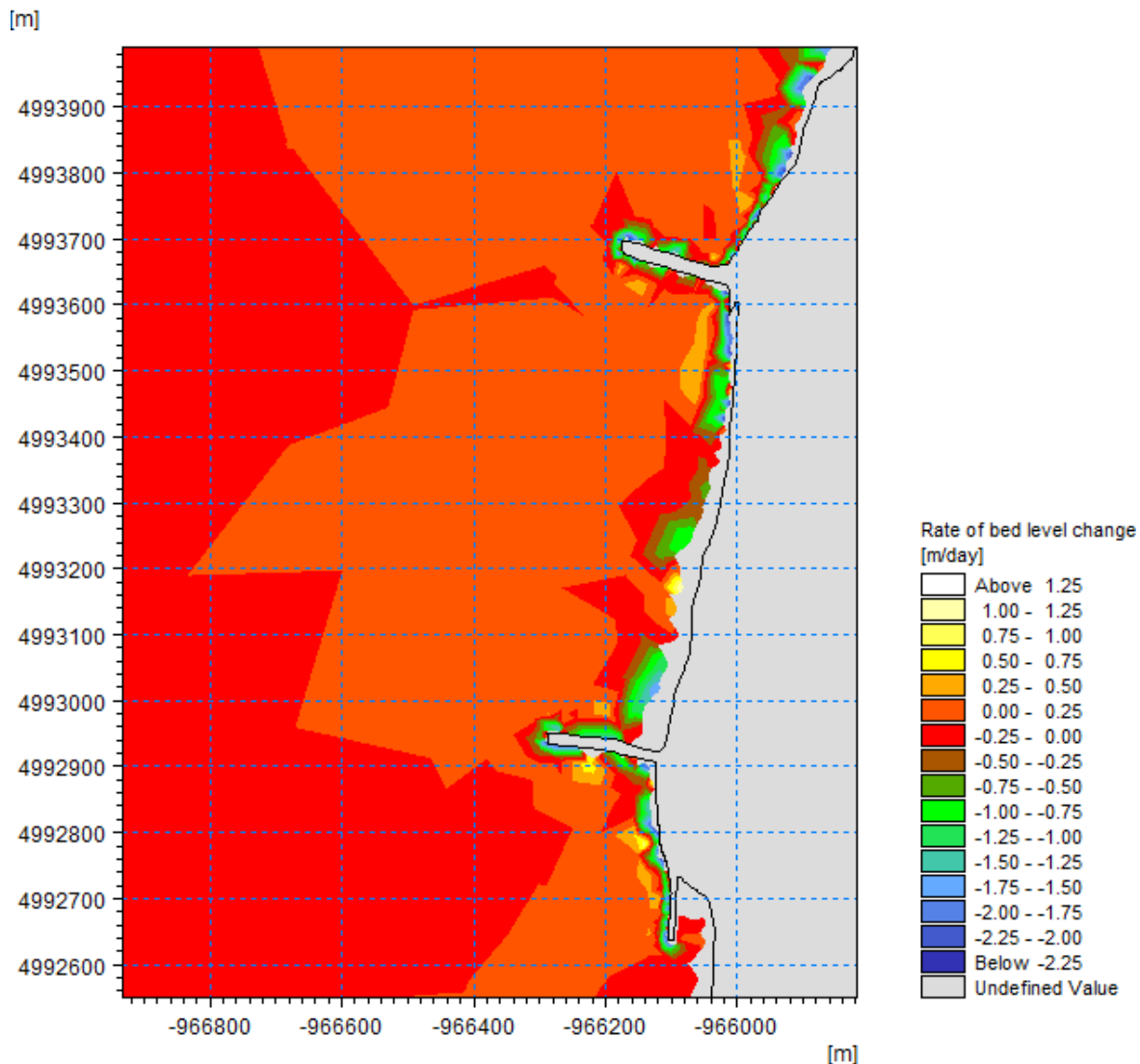


Fig.5.15 – Taxa de alteração do nível dos fundos (Hs=2.2m; Tp=11.4s; Noroeste)

A taxa de alteração do nível dos fundos indica as zonas de potencial erosão ou acreção consoante o seu valor seja negativo ou positivo, respetivamente. Junto à costa, percebe-se que, praticamente, apenas acontecem fenómenos de erosão, não se detetando grandes diferenças entre as zonas a norte e a sul dos esporões. A sul do esporão norte, há uma pequena zona de potencial acreção, ao contrário do que seria esperado, visto que seria expectável que as zonas de acreção se situassem a norte dos esporões.

De seguida, serão avaliados os resultados relativos às condições de temporal que têm também grande relevância no estudo em curso. Para estas condições, adotou-se uma altura de onda significativa de 6m, um período de pico de 14s e direção de oeste.

Os primeiros resultados a analisar são referentes ao *Hydrodynamic Module*: nível médio da água e velocidade da corrente.

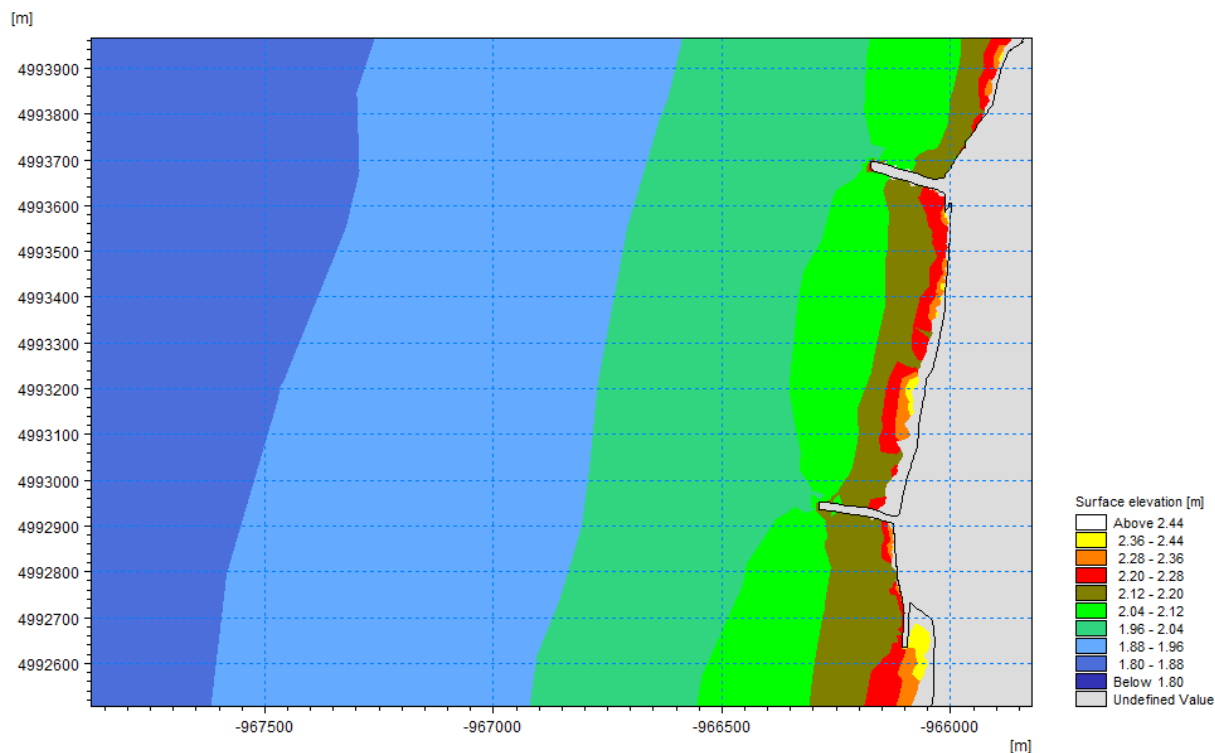


Fig.5.16 – Nível médio da água, ao Z.T. (Hs=6m; Tp=14s; Oeste)

Tal como na situação anterior, o nível médio da água (Fig.5.16) é aproximadamente igual ao valor introduzido, 1.85m ao Z.T., e aumenta à medida que se aproxima da costa. No entanto, em condições de temporal, o aumento do nível médio da água ocorre a uma distância maior da linha de costa, atingindo valores até 2.3m, ao Z.T., junto desta.

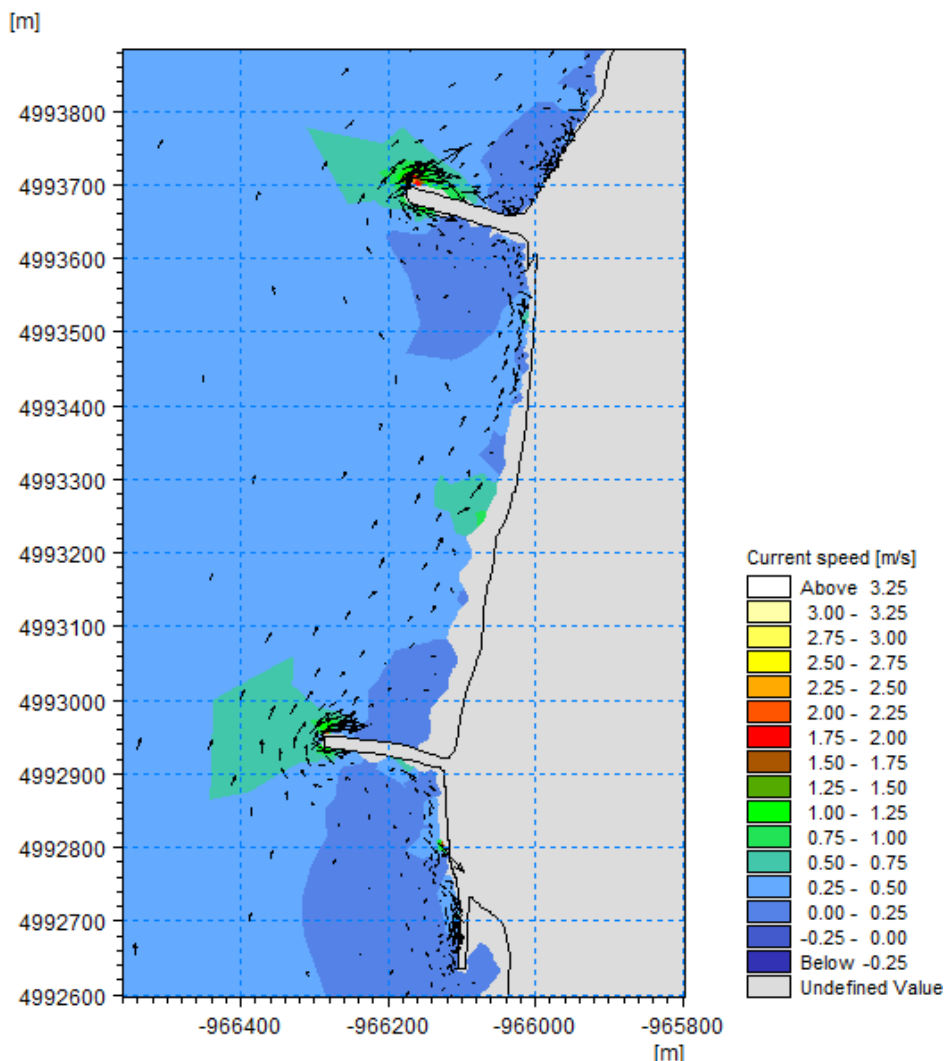


Fig.5.17 – Velocidade da corrente e respectivos vetores ( $H_s=6m$ ;  $T_p=14s$ ; Oeste)

Nas presentes condições, o aumento da velocidade da corrente (Fig.5.17) acontece espacialmente mais cedo atingindo valores superiores, quando comparado com a situação descrita anteriormente. Contudo, junto à linha de costa, a velocidade da corrente torna-se menor, especialmente a norte e a sul dos esporões, excetuando-se certos pontos onde são visíveis velocidades muito superiores, especificamente na cabeça dos esporões, na estrutura longitudinal aderente sul e a meia distância entre os esporões.

Ao contrário da situação anterior, devido à direção da agitação ser oriunda de oeste e ao efeito da batimetria, os vetores velocidade têm sentido de sul para norte e, no encontro com os esporões, os vetores tendem a contorná-los, apesar do sentido da corrente neste local ser muito variável, como se pode constatar na Fig.5.17.

Seguidamente, são analisados os resultados referentes ao *Spectral Wave Module*: altura de onda significativa e máxima, período de pico da onda, direção média da onda e potência da onda.

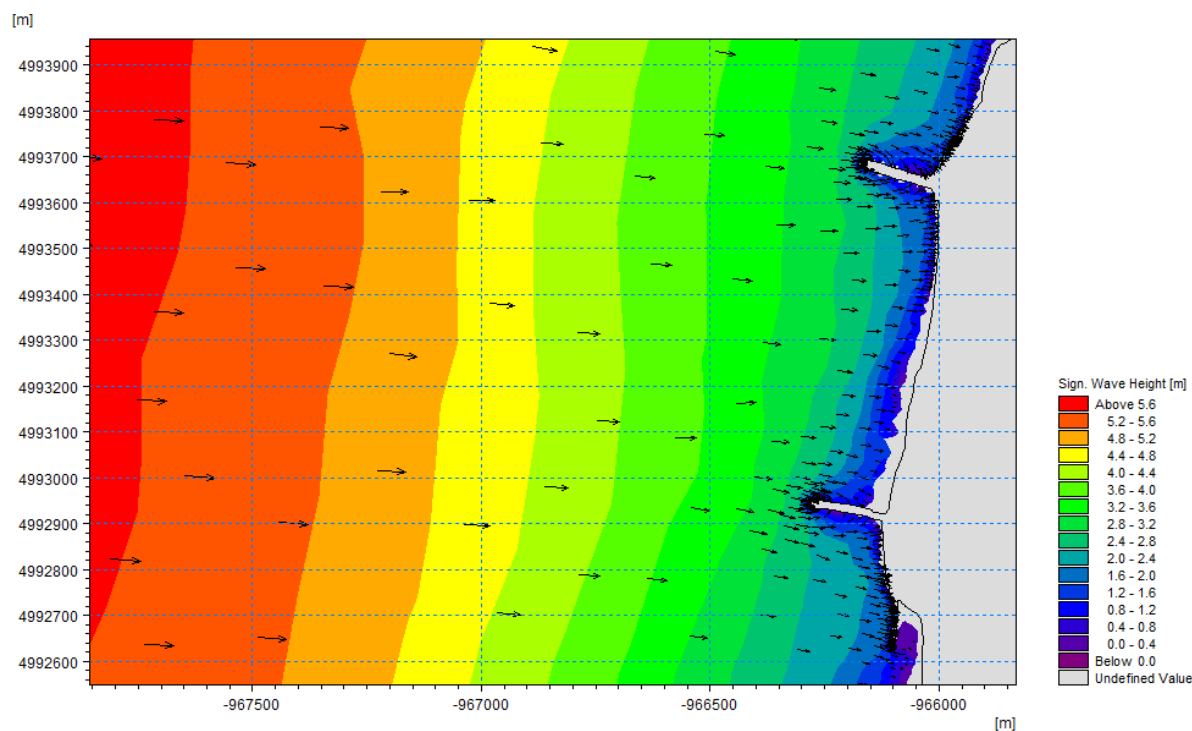


Fig.5.18 – Altura de onda significativa e vetores representativos da direção da onda ( $H_s=6\text{m}$ ;  $T_p=14\text{s}$ ; Oeste)

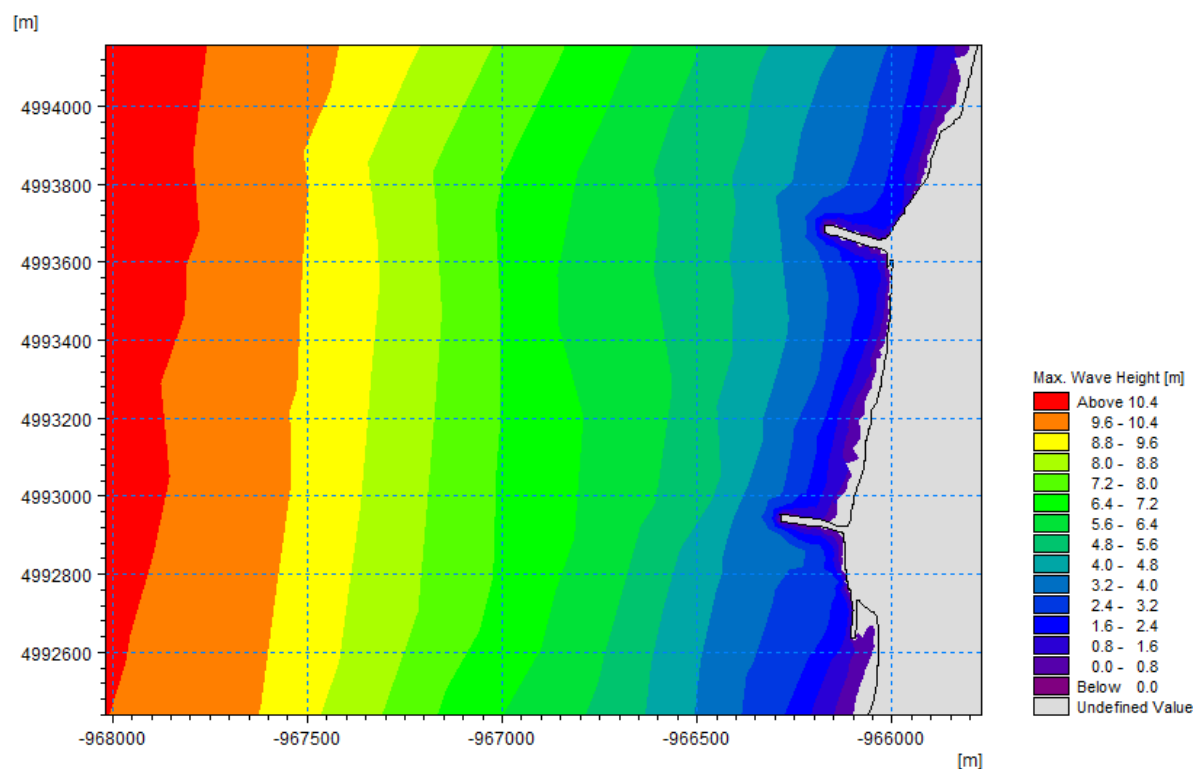


Fig.5.19 – Altura de onda máxima ( $H_s=6\text{m}$ ;  $T_p=14\text{s}$ ; Oeste)

A altura de onda significativa (Fig.5.18) assume, ao largo, o valor introduzido inicialmente – 6m, mas a sua diminuição começa a uma distância maior da linha de costa, comparativamente com o caso de condições médias, devido à altura de onda ser maior. Quando se aproxima dos esporões, estes são atingidos por uma altura de onda significativa de cerca de 2.5m.

A cabeça dos esporões e a estrutura longitudinal aderente sul são zonas atingidas por ondas de altura superior. Para além disso, nas regiões a norte e a sul dos esporões, as ondas atingem a marginal, dando-se a sua rebentação junto a esta.

Devido à agitação ser proveniente de oeste, os efeitos de difração são, neste caso, pouco notórios.

No que diz respeito à altura de onda máxima (Fig.5.19), o seu valor é da ordem dos 11m ao largo e de 3m quando atinge os esporões. A altura de onda máxima de 11m ao largo pode ser novamente validada pela relação entre a altura de onda máxima e a altura de onda significativa ser aproximadamente 1.8 ( $H_{max}/H_s=11/6=1.83\sim 1.8$ ).

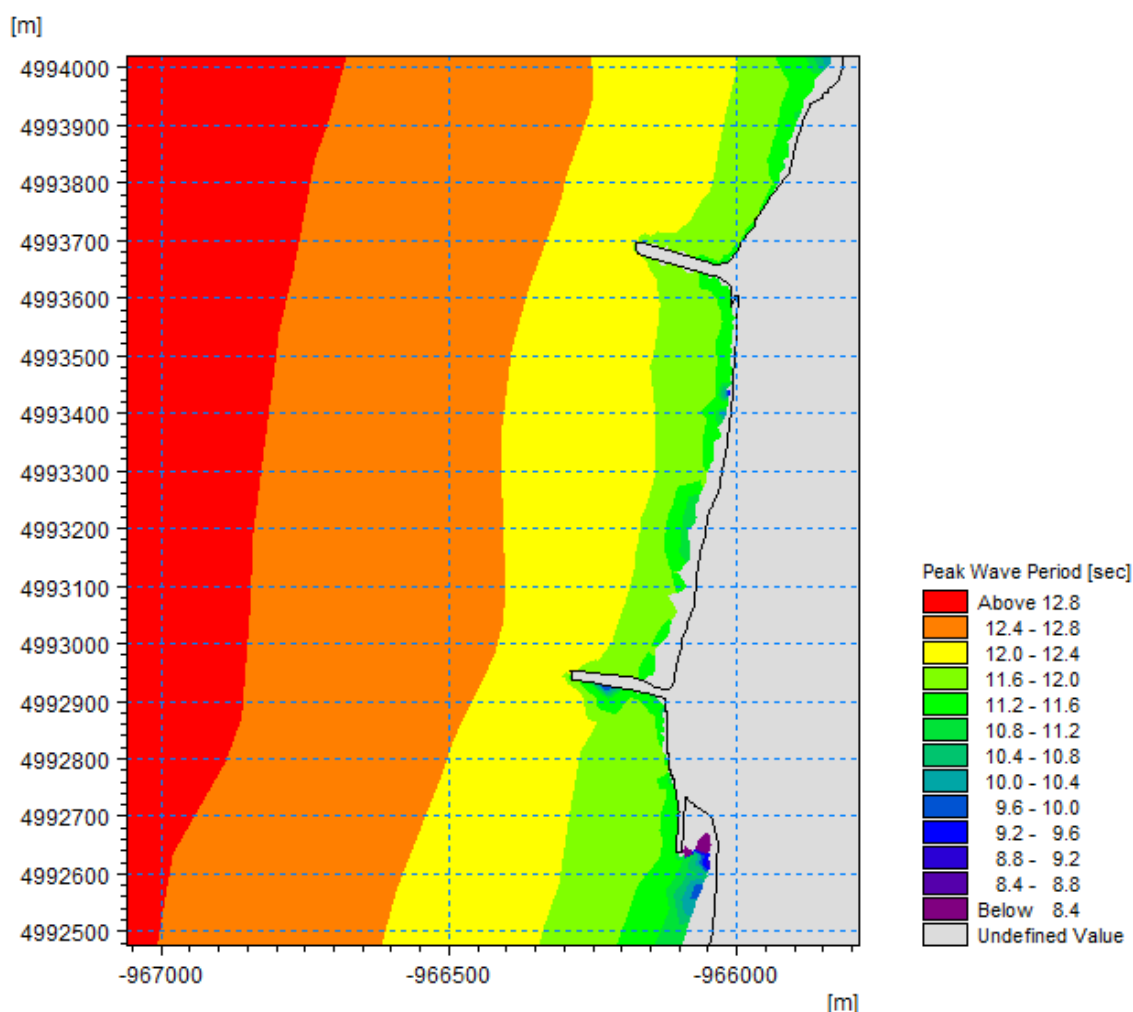


Fig.5.20 – Período da onda de pico ( $H_s=6m$ ;  $T_p=14s$ ; Oeste)

O período da onda de pico (Fig.5.20) diminui à medida que se aproxima da costa, começando com um valor de 14s e, já próximo da costa, tem valores de aproximadamente 11.5s.

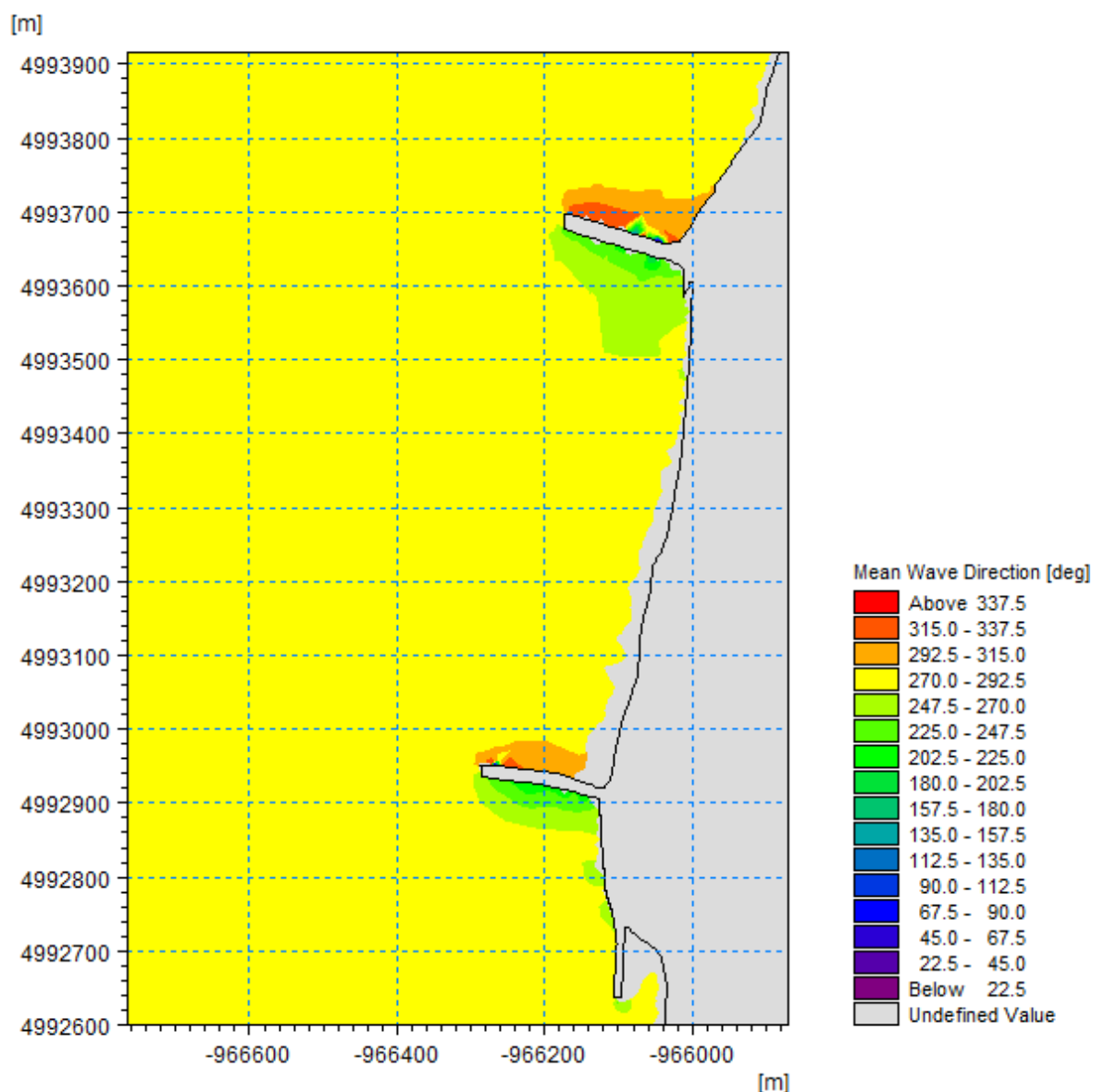


Fig.5.21 – Direção média da onda (Hs=6m; Tp=14s; Oeste)

No geral, a direção média da onda, cuja variação se encontra representada na Fig.5.21, assume valores entre 270 e 292.5°, ou seja, valores próximos da direção oeste (270°). Em torno dos esporões, encontram-se algumas diferenças: a norte, a direção aproxima-se de noroeste (292.5-315°) e, a sul, de sudoeste (225-247.5°), devido a efeitos de difração e refração.

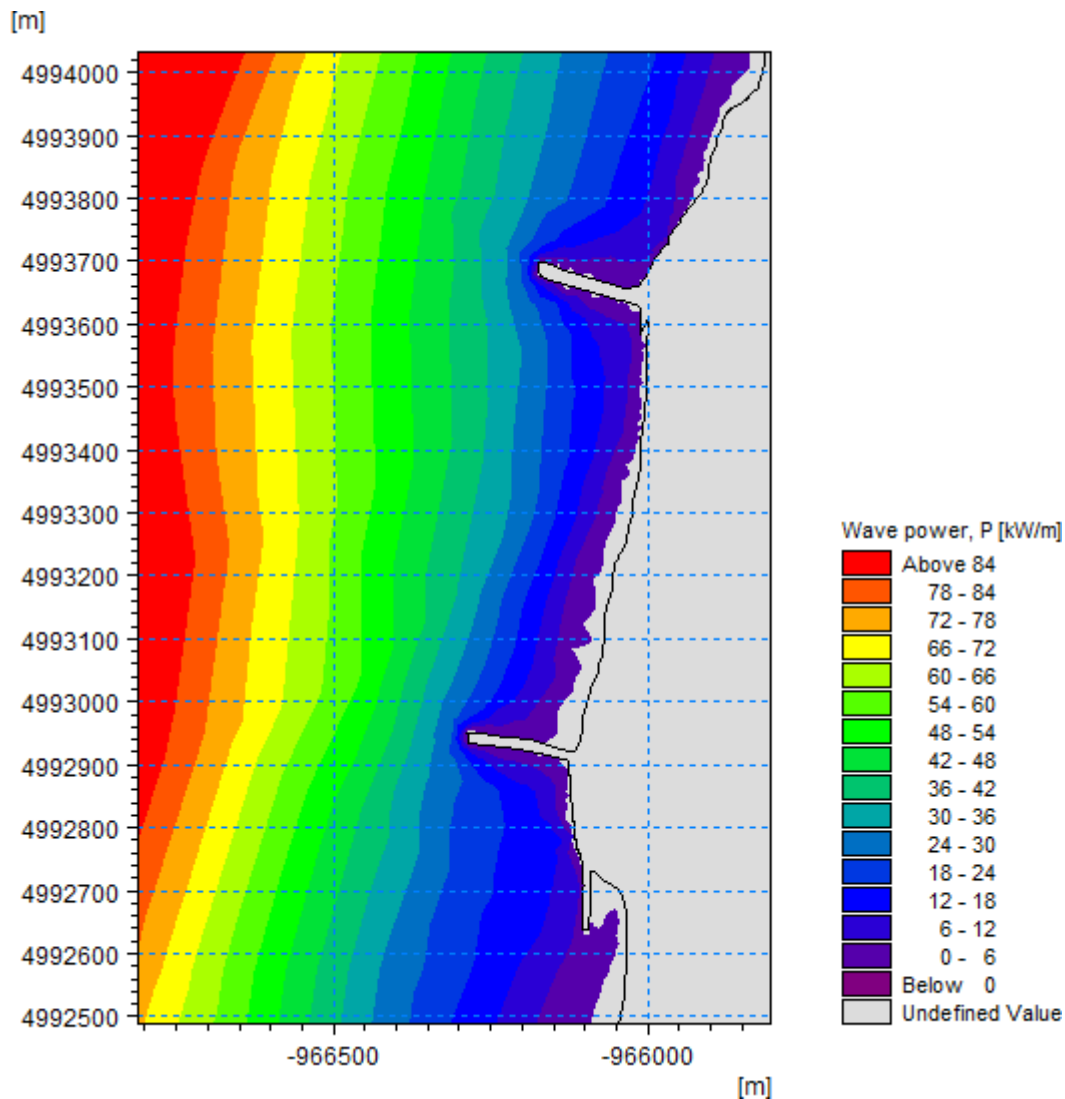


Fig.5.22 – Potência da onda ( $H_s=6\text{m}$ ;  $T_p=14\text{s}$ ; Oeste)

Como era de prever, neste caso, a potência da onda (Fig.5.22) tem valores superiores, pois a altura de onda é maior, sendo assim as ondas atingem a costa com uma energia maior.

Por último, são avaliados os resultados provenientes da aplicação do *Sand Transport Module*, mais especificamente o caudal sólido transportado e a taxa de alteração do nível dos fundos.



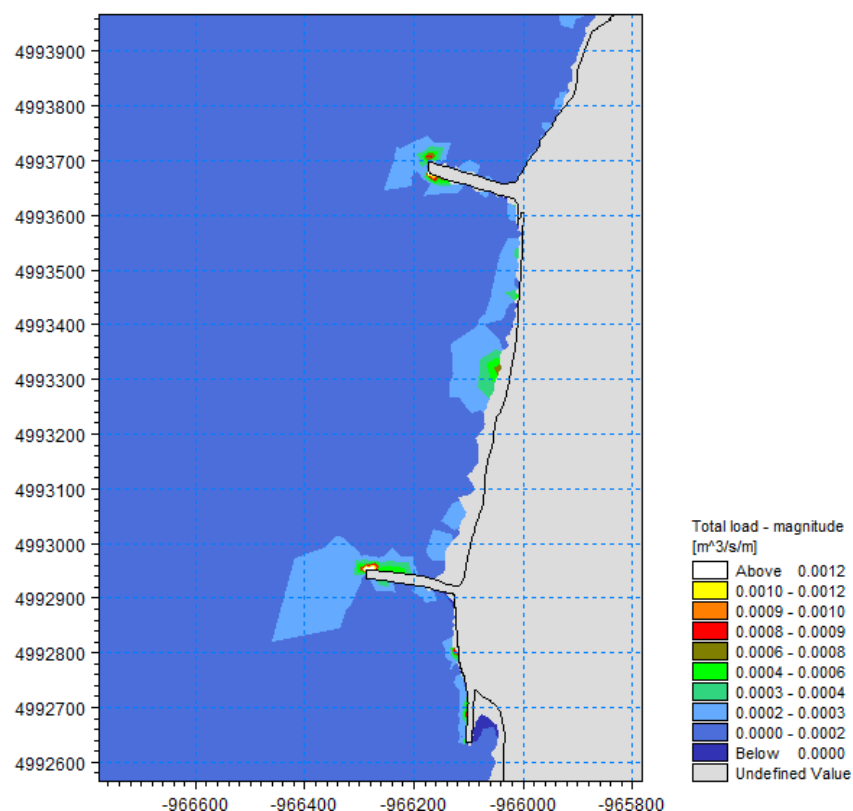


Fig.5.23 – Caudal sólido transportado (Hs=6m; Tp=14s; Oeste)

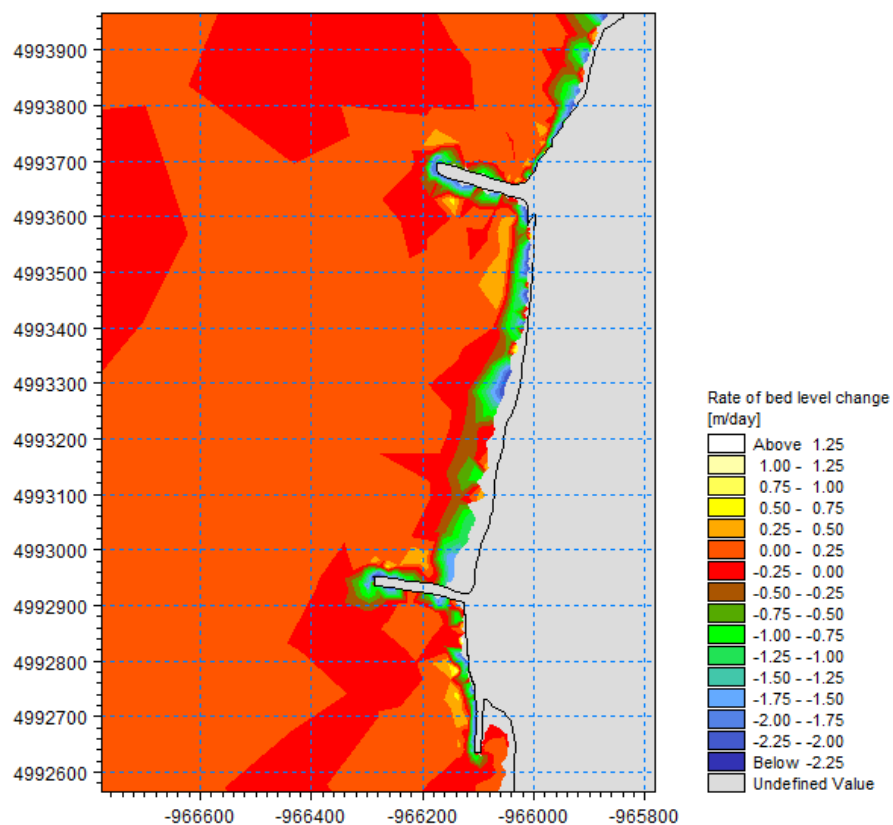


Fig.5.24 – Taxa de alteração do nível dos fundos (Hs=6m; Tp=14s; Oeste)

Nestas condições de temporal, devido à alteração da direção da agitação marítima para oeste, o caudal sólido transportado (Fig.5.23), contrariamente à situação anterior, tem sentido de sul para norte. Os vetores representativos do sentido do transporte não estão representados, pois são de difícil perceção, mas foram observados no *software*. O transporte do caudal sólido é maior, comparativamente com a situação de condições médias, intensificando-se na zona mais a norte entre os esporões e na cabeça destes.

A variação da taxa de alteração do nível dos fundos, apresentada na Fig.5.24, mostra grande erosão na zona entre esporões, erosão esta mais evidente nas presentes condições de temporal, sendo, junto à costa, mais uma vez, raros os fenómenos de acreção. Também a barlamar do esporão norte, na cabeça dos esporões e na estrutura longitudinal sul, estes fenómenos são observados. Os fenómenos de acreção existentes são apenas notados a sul do esporão norte.

Em suma, as condições junto à linha de costa, em situação de temporal, agravam-se em quase todos os campos analisados, relativamente à situação de agitação média. No que diz respeito à dinâmica das ondas, a altura e a energia aumentam em condições de temporal. Em ambas as condições de agitação, as regiões a destacar são a estrutura longitudinal aderente sul e a cabeça dos esporões, atingidas por ondas de altura superior, assim como a norte e a sul do esporão norte, onde as ondas atingem a marginal, rebentando junto desta. Os fenómenos de refração são bem visíveis em ambas as condições, no entanto, os fenómenos de difração são pouco notórios na situação de temporal, fenómenos estes que provocam alteração da direção de agitação junto à linha de costa e estruturas de defesa costeira existentes. Relativamente aos fenómenos de erosão, parâmetro importante na comparação de ambas as condições de agitação, estes são mais intensos nas condições de temporal, como seria de prever.

### 5.3.2. SIMULAÇÃO DA SITUAÇÃO DE UM QUEBRAMAR DESTACADO

Após a análise da situação de referência, pretende-se estudar a solução de um quebramar destacado para a redução dos problemas de erosão na frente urbana do Furadouro, tanto para as condições médias como para as de temporal. A solução proposta corresponde a um quebramar destacado com 250m de comprimento e 20m de largura do coroamento.

Os resultados que se seguem dizem respeito às condições de agitação marítima médias, em que se adotou uma altura significativa de 2.2m, um período de pico de 11.4s e direção de noroeste.

A primeira análise debruça-se sobre os resultados do *Hydrodynamic Module* relativos a níveis de água e correntes.

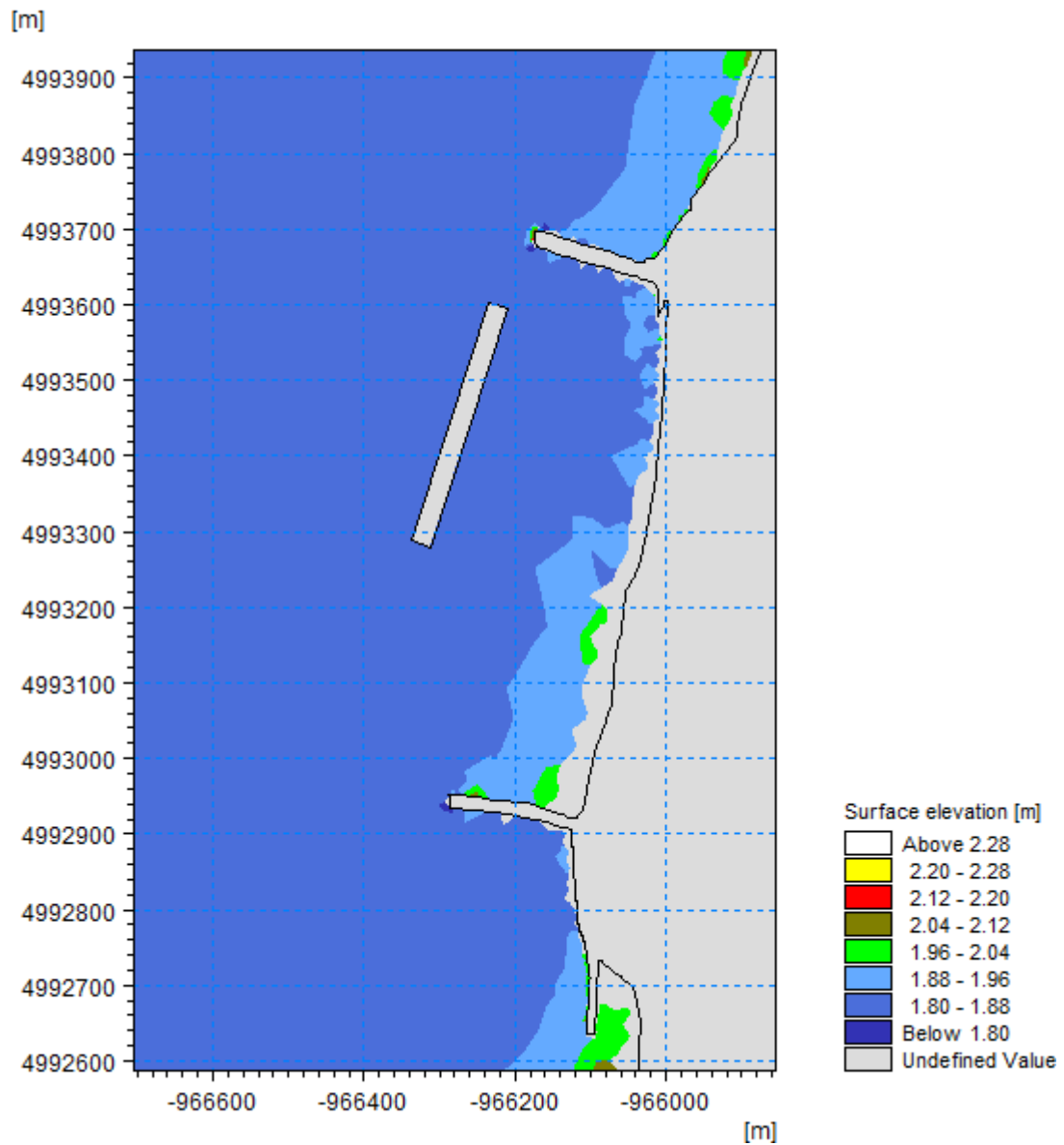


Fig.5.25 – Nível médio da água, ao Z.T. ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

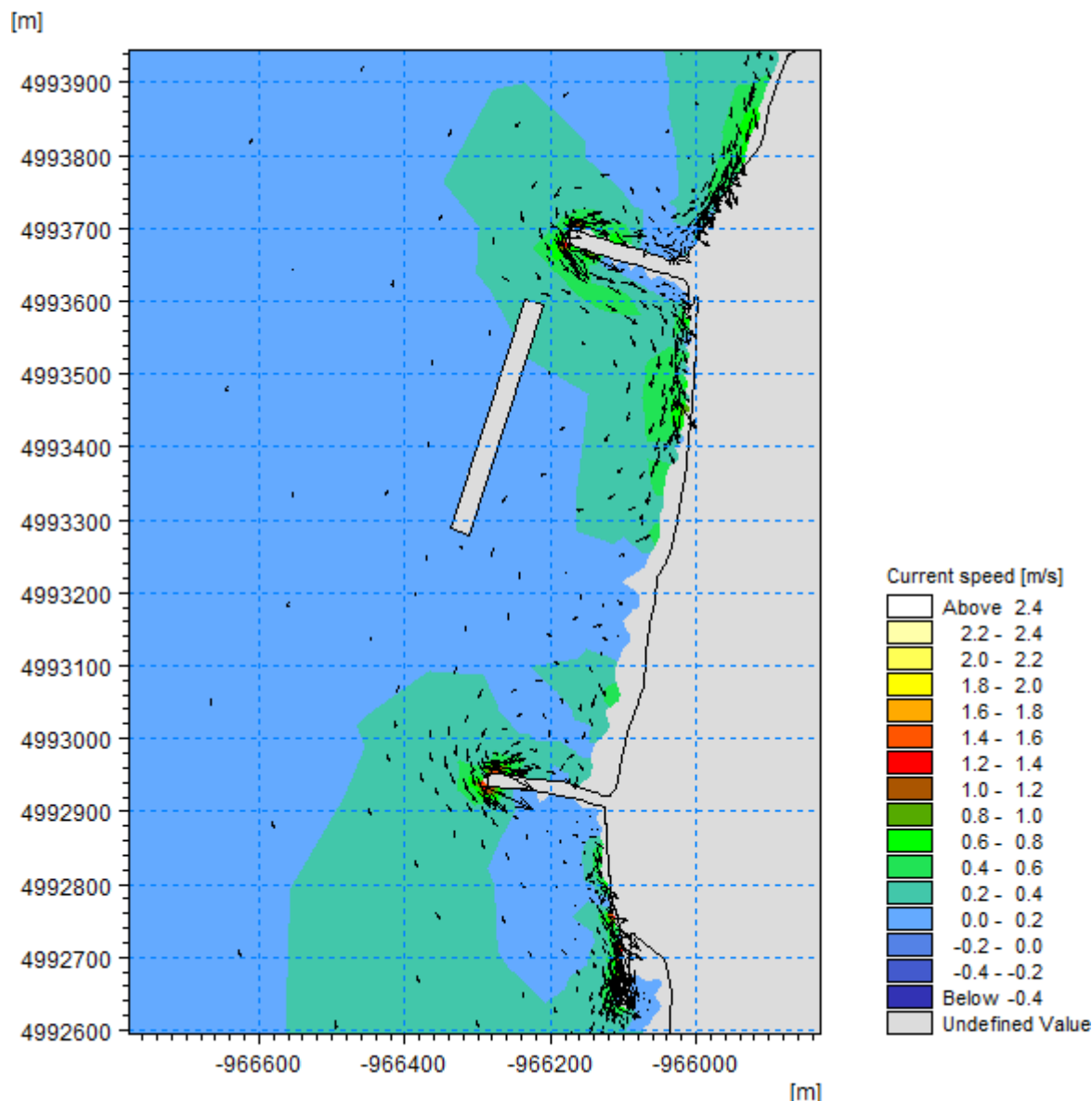


Fig.5.26 – Velocidade da corrente e respectivos vetores ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

Nas presentes condições, o quebra-mar destacado tem muito pouca influência na alteração do nível médio da água (Fig.5.25). Apenas a sotamar do quebra-mar se deteta uma ligeira diminuição desse nível, comparativamente com a situação de referência.

Quanto à parametrização das correntes, o quebra-mar destacado faz com que haja uma diminuição significativa da velocidade da corrente (Fig.5.26) a sotamar, exceto a sul do esporão norte, onde se cria um canal com velocidades de corrente superiores.

Como seria de esperar, o sentido dos vetores velocidade (Fig.5.26) é alterado ligeiramente pela presença do quebra-mar. O sentido da corrente é, no geral, de norte para sul, sendo que, no encontro dos esporões e do quebra-mar destacado, este tende a alterar-se, contornando estas estruturas.

De seguida, serão avaliados os parâmetros referentes ao *Spectral Wave Module*, nomeadamente altura, período, direção e potência de onda.

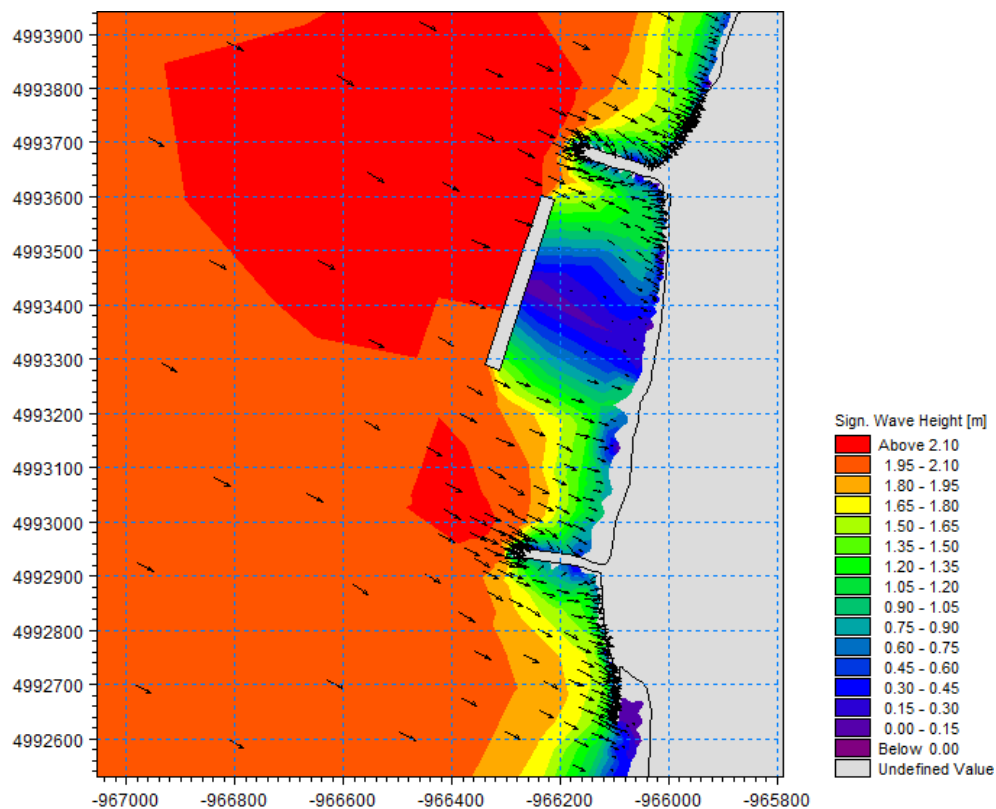


Fig.5.27 – Altura de onda significativa e vetores representativos da direção de onda ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

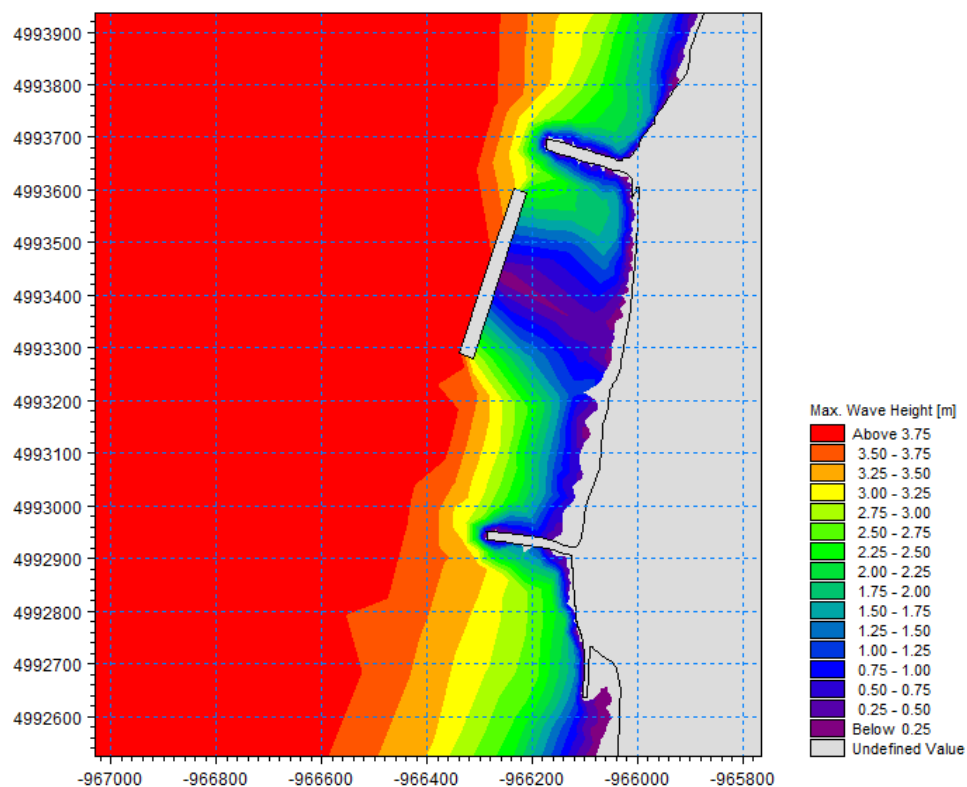


Fig.5.28 – Altura de onda máxima ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

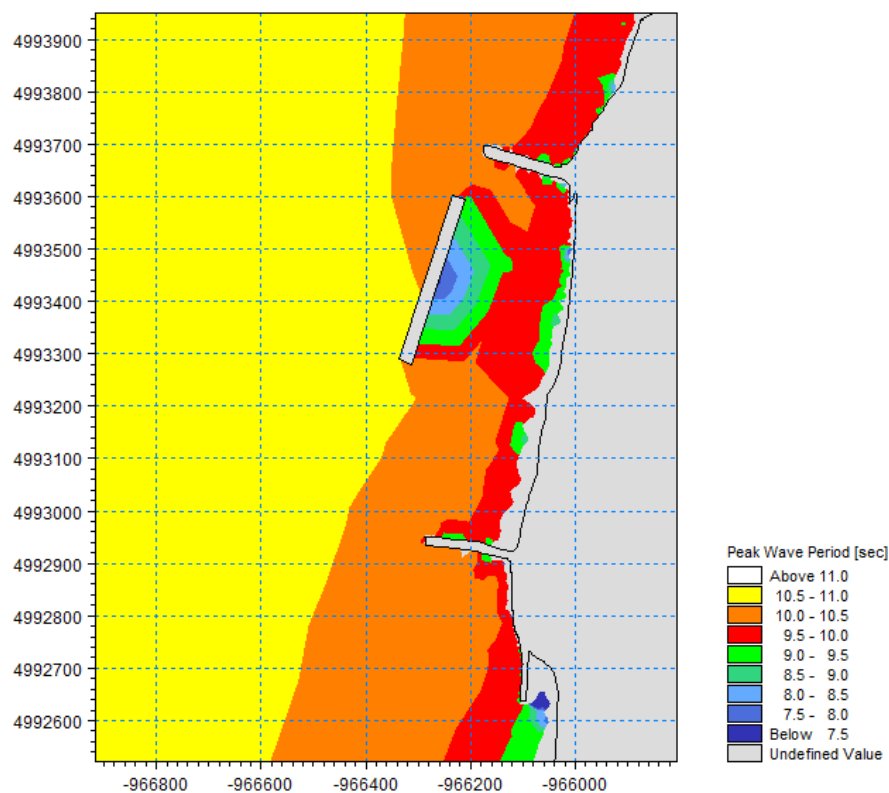


Fig.5.29 – Período da onda de pico ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

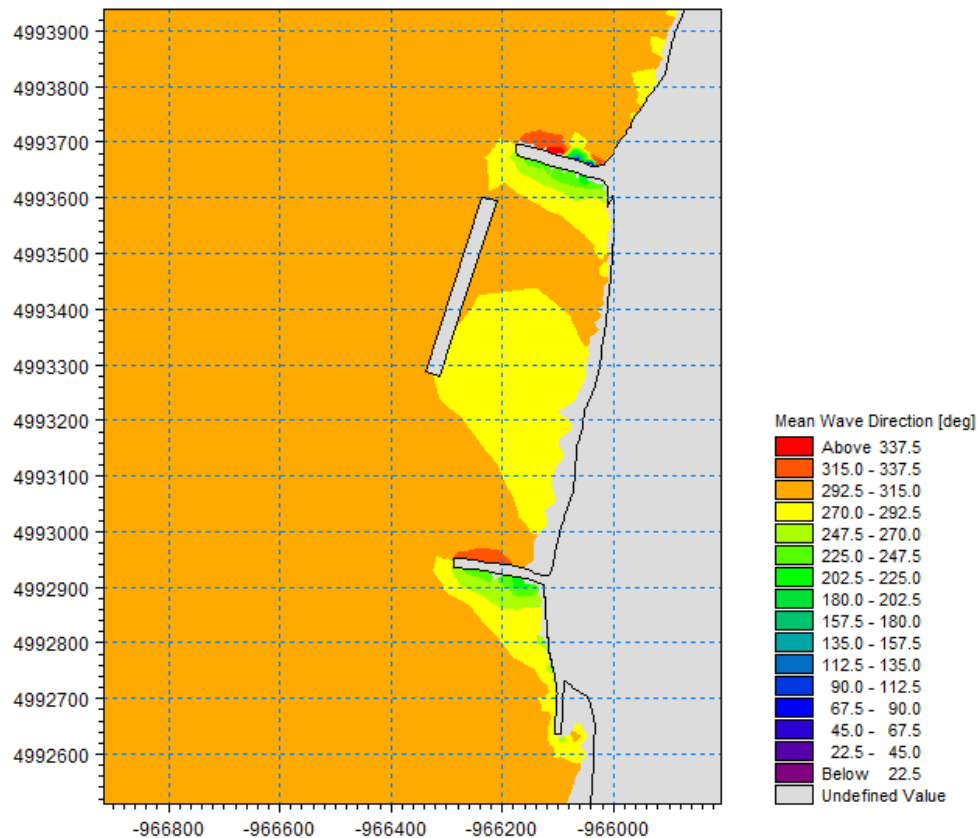
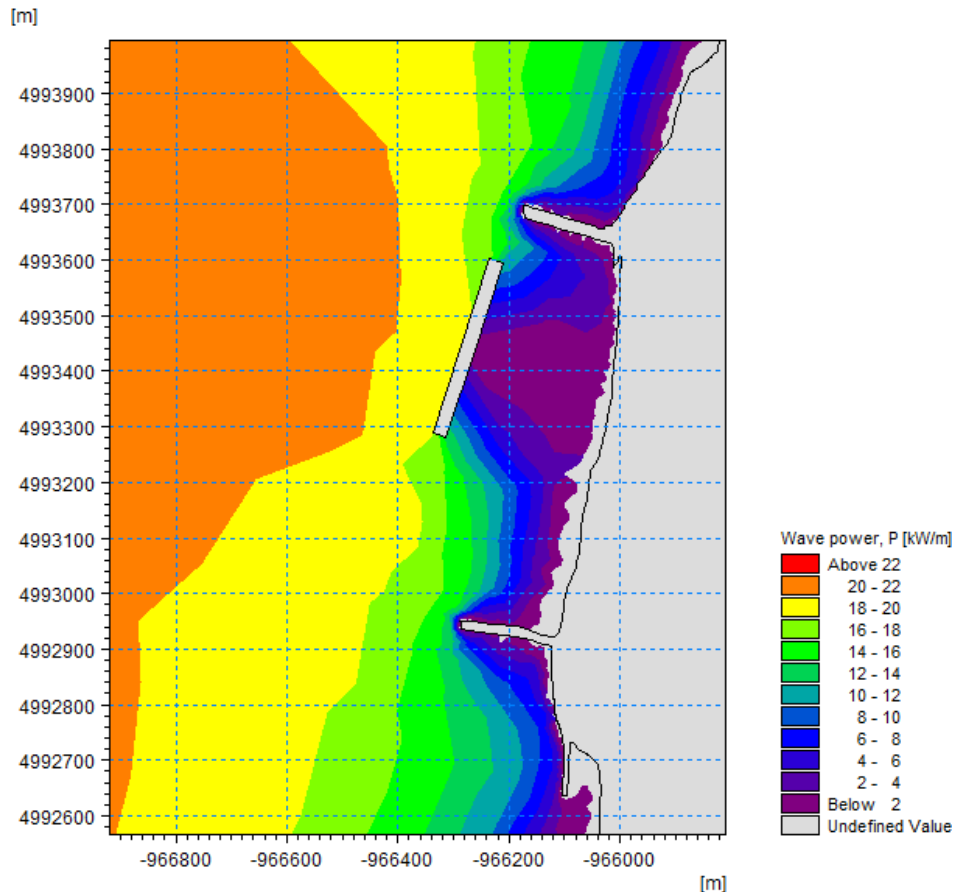


Fig.5.30 – Direção média de onda ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

Fig.5.31 – Potência da onda ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

Em ambas as figuras 5.27 e 5.28, é bem clara a importância do quebramar destacado na diminuição da altura de onda a sotamar. O quebramar destacado é atingido por ondas com uma altura significativa de cerca de 2m e uma altura máxima de quase 4m, contudo a altura de onda a sotamar do quebramar é significativamente menor, com alturas menores que 1m em ambos os casos. Os fenómenos de difração provocados pelo quebramar destacado são bem notórios entre este e os esporões.

De destacar que, neste modelo, a estrutura não é galgável nem lhe está atribuída qualquer rugosidade, como já foi referido anteriormente.

Relativamente ao período de pico da onda, é possível observar, na Fig.5.29, a redução do período de pico a sotamar do quebramar para cerca de 8s.

Na Fig.5.30, é clara a direção dominante, de noroeste ( $315^\circ$ ), havendo alterações apenas junto à costa, principalmente em torno das estruturas de proteção costeira. A sotamar do quebramar destacado, devido aos efeitos de difração, a direção da onda altera-se ligeiramente, aproximando-se da direção oeste ( $270\text{-}292.5^\circ$ ).

No que respeita à potência das ondas, o quebramar destacado é atingido por ondas com potência de  $19\text{kW/m}$ , sendo notória, mais uma vez, a influência deste na diminuição da potência da onda a sotamar, como se observa na Fig.5.31.

O último módulo a ser analisado é o *Sand Transport Module*, relacionado com o caudal sólido transportado e as alterações do nível dos fundos.

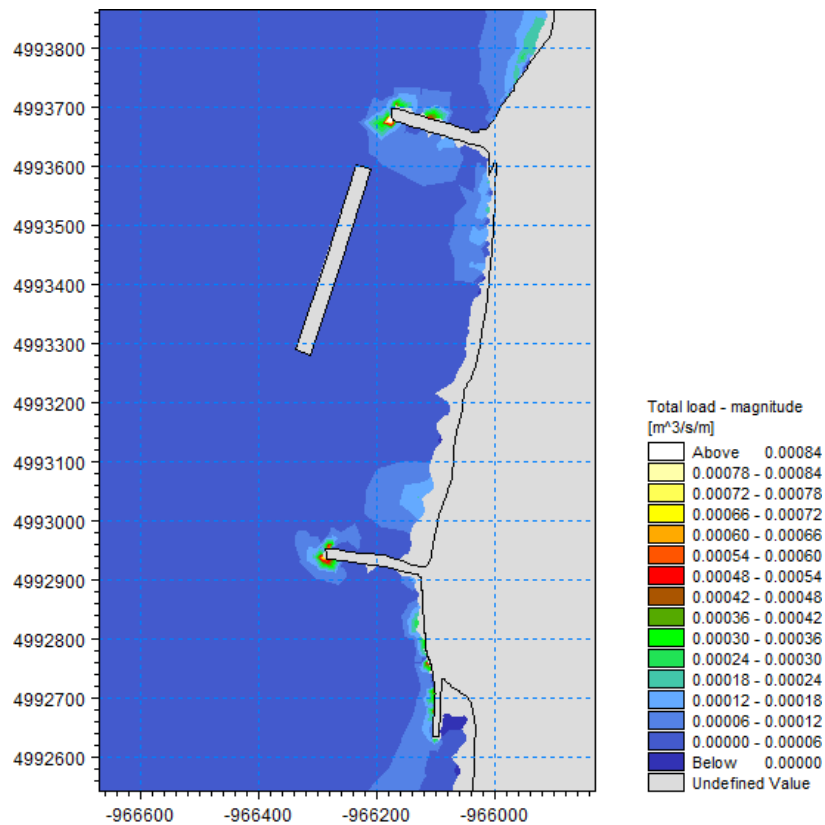


Fig.5.32 – Caudal sólido transportado (Hs=2.2m; Tp=11.4s; Noroeste)

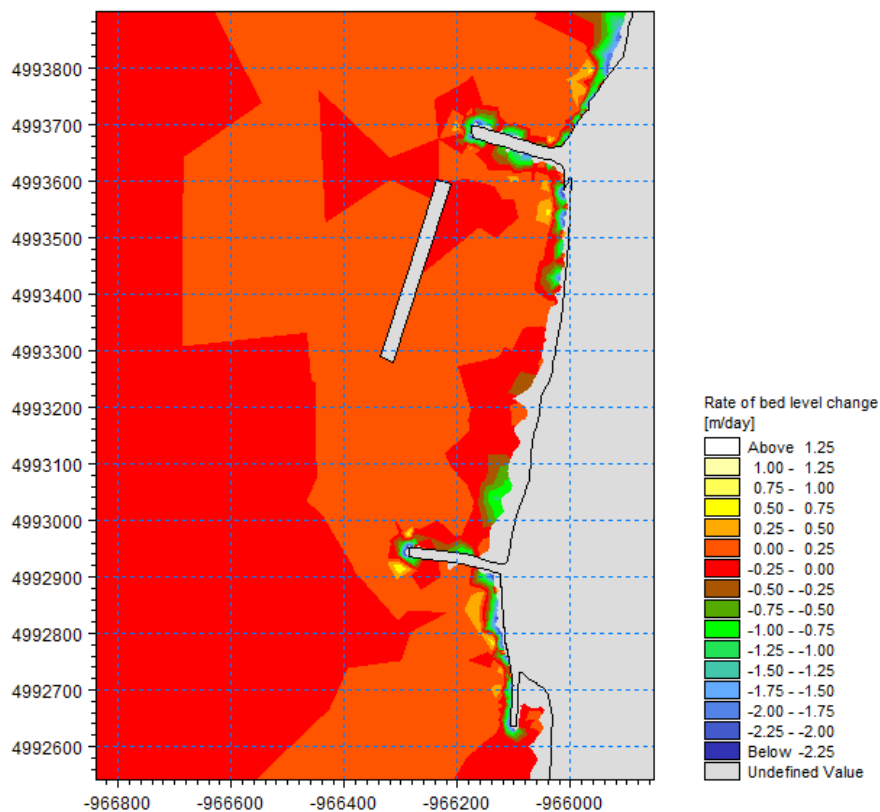


Fig.5.33 – Taxa de alteração do nível dos fundos (Hs=2.2m; Tp=11.4s; Noroeste)



O quebramar destacado reduz, significativamente, o caudal sólido transportado (Fig.5.32) a sotamar, exceto, a sul do esporão norte, onde se nota um aumento deste transporte.

A taxa de alteração do nível dos fundos (Fig.5.33) permite concluir que a presença do quebramar destacado diminui a erosão entre os esporões. Na extremidade norte deste, há vestígios de possível erosão.

De seguida, apresentam-se os resultados relativos às condições de temporal onde se adotou uma altura significativa de 6m, um período de pico de 14s e uma direção de oeste.

Nas figuras 5.34 e 5.35, apresenta-se a variação do nível médio da água e da velocidade da corrente.

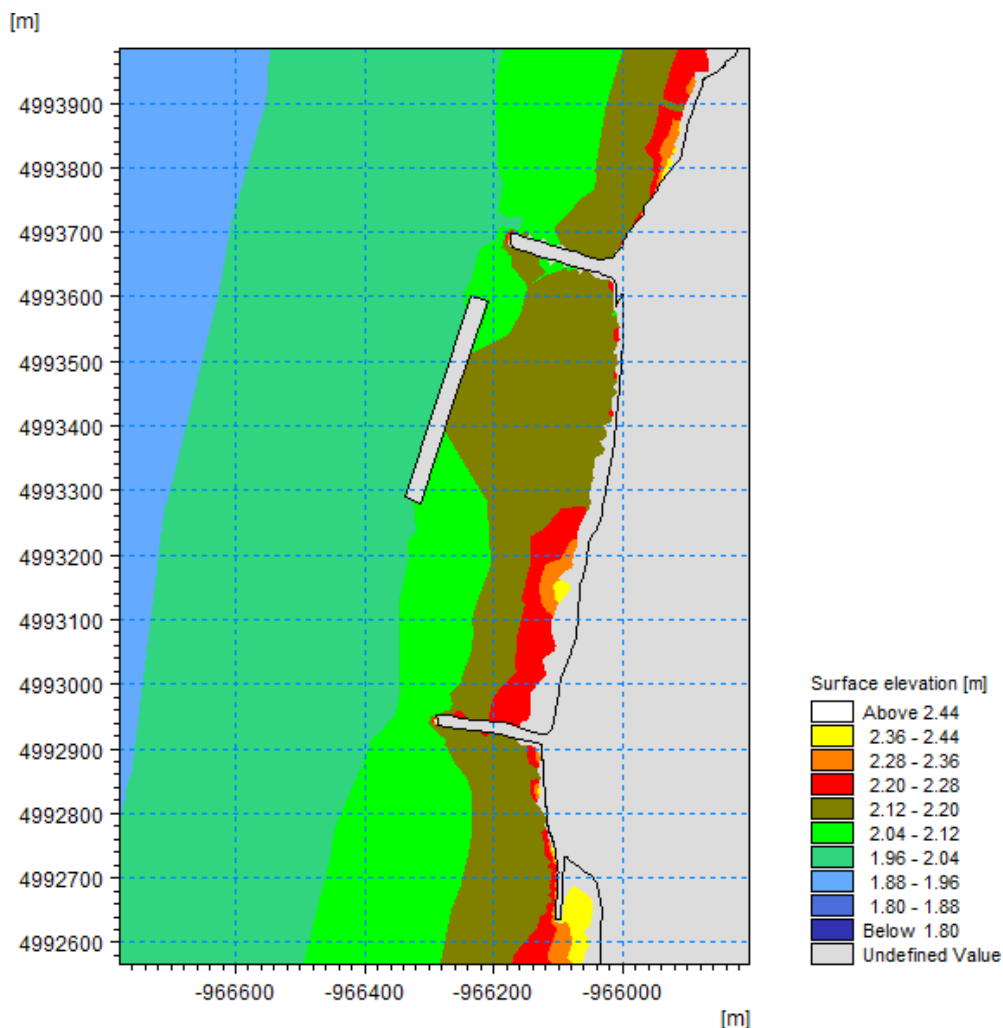


Fig.5.34 – Nível médio da água, ao Z.T. (Hs=6m; Tp=14s; Oeste)

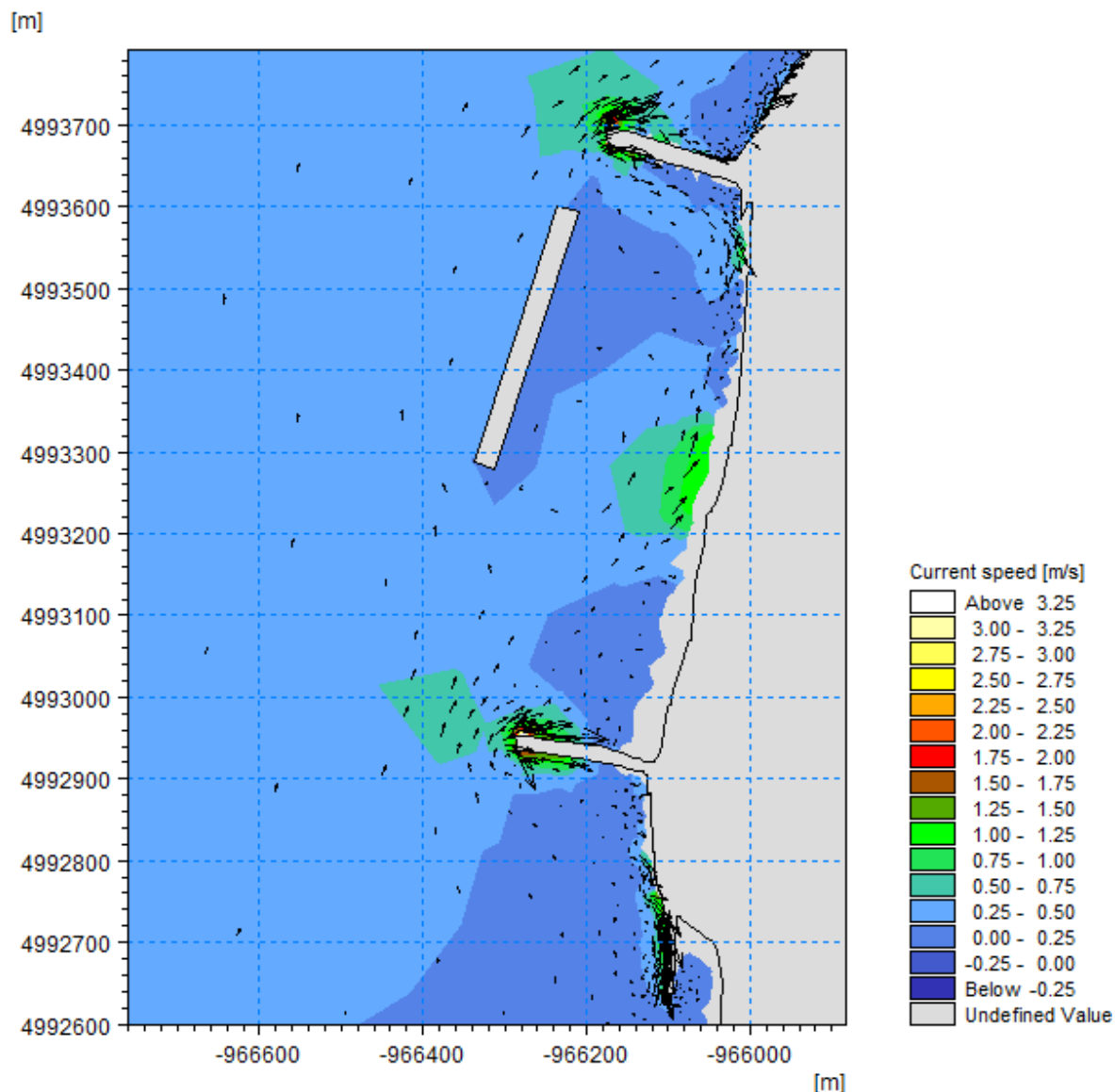


Fig.5.35 – Velocidade da corrente e respectivos vetores (Hs=6m; Tp=14s; Oeste)

Em condições de temporal, o quebramar destacado altera ligeiramente o nível médio da água (Fig.5.34), sendo que a sotamar deste esse nível aumenta até cerca de 2.2m.

O quebramar destacado tem influência na velocidade da corrente (Fig.5.35), visto que a sotamar deste a velocidade diminui. No entanto, nestas condições, entre o esporão norte e o quebramar destacado, cria-se um canal que faz com que, junto à linha de costa, se originem velocidades de corrente superiores, o que acontece também entre o esporão sul e o quebramar, provocando o aumento da velocidade a meia distância entre os esporões. Os vetores velocidade (Fig.5.35) mostram que o sentido da corrente é, no geral, de sul para norte. Contudo, este sentido é muito variável em torno das estruturas de defesa costeira existentes, pois estas funcionam como obstáculos à normal circulação da corrente.

As figuras que se seguem representam os parâmetros de onda: altura significativa e máxima, direção, período e potência.

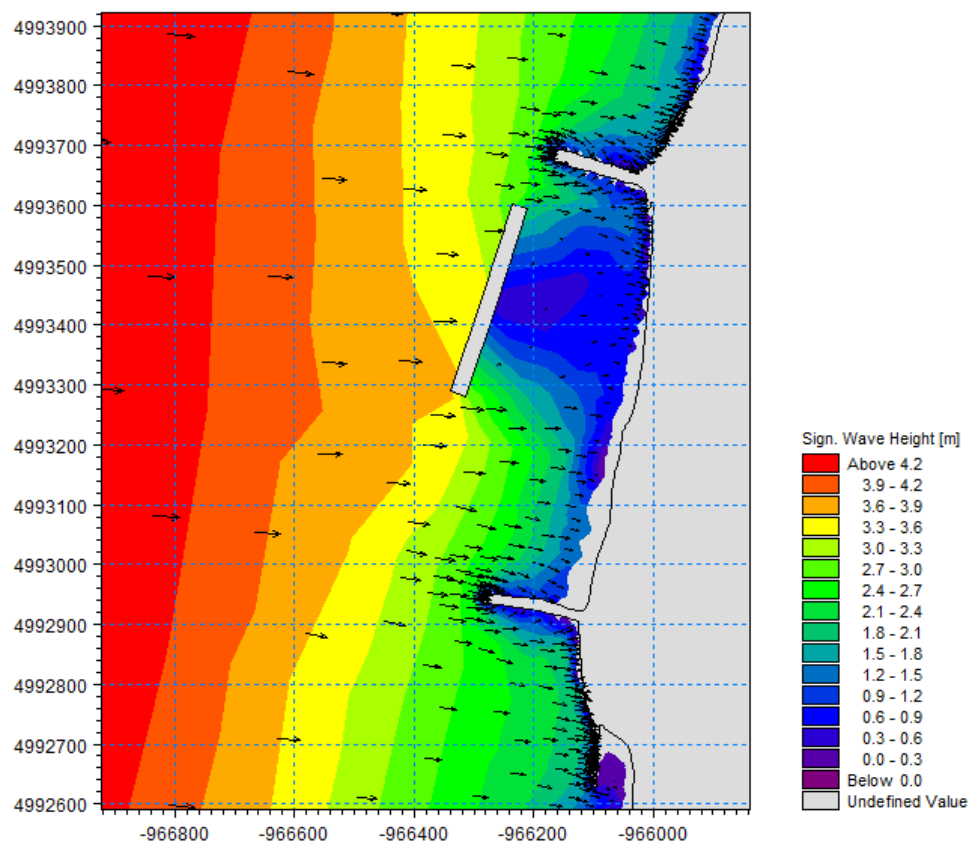


Fig.5.36 – Altura de onda significativa e vetores representativos da direção de onda (Hs=6m; Tp=14s; Oeste)

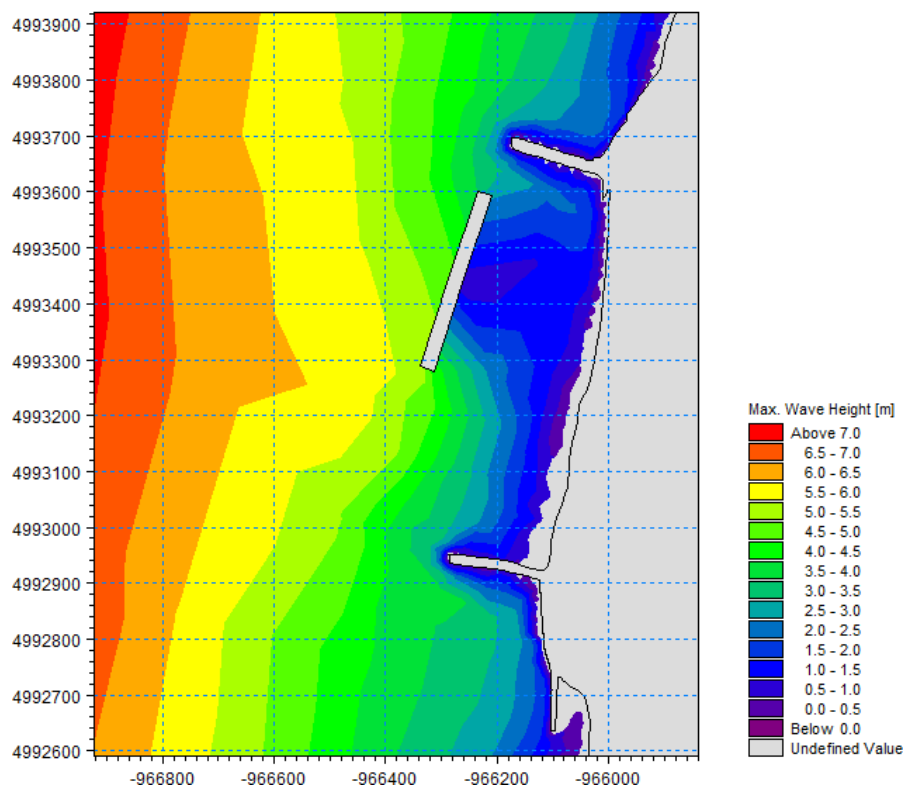


Fig.5.37 – Altura de onda máxima (Hs=6m; Tp=14s; Oeste)

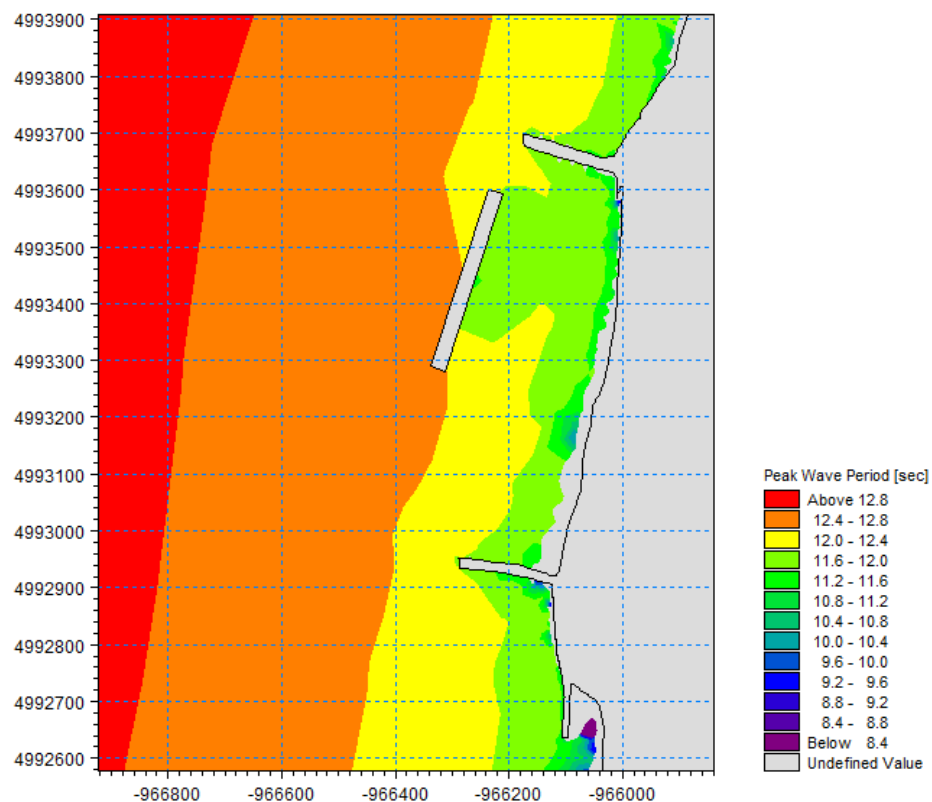


Fig.5.38 – Período da onda de pico ( $H_s=6m$ ;  $T_p=14s$ ; Oeste)

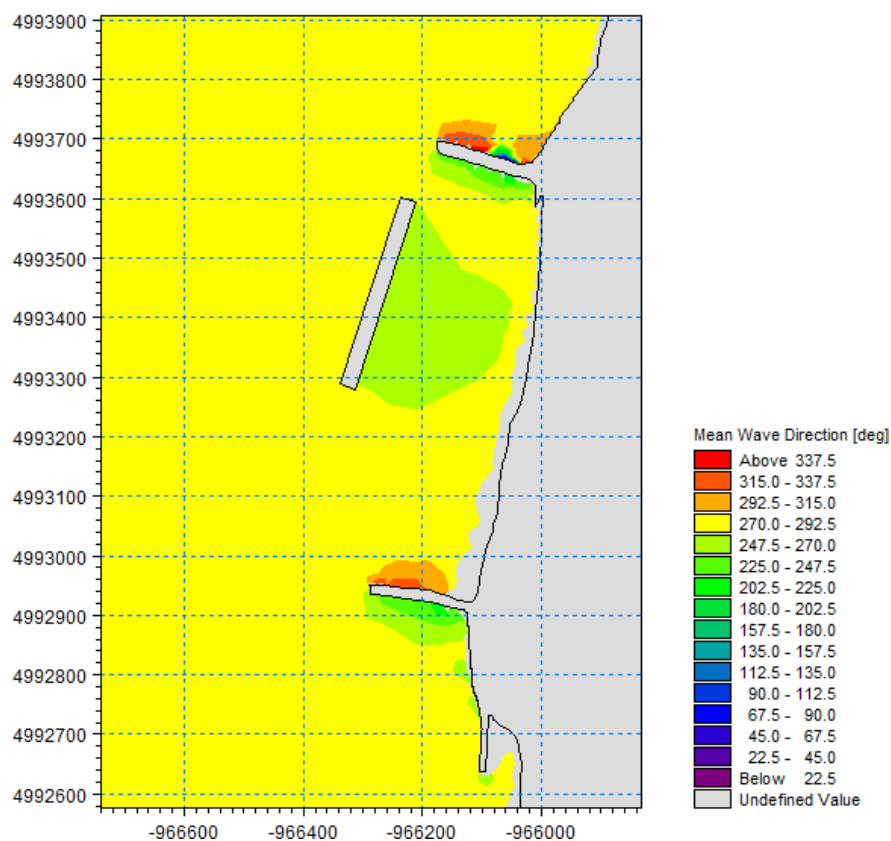
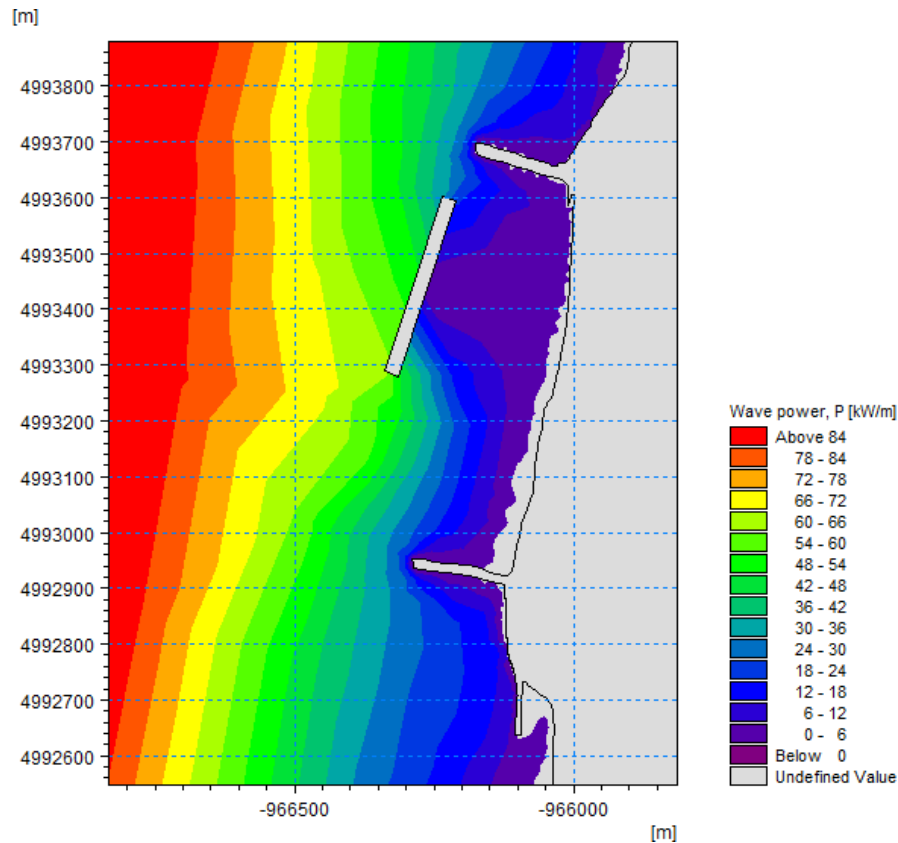


Fig.5.39 – Direção média de onda ( $H_s=6m$ ;  $T_p=14s$ ; Oeste)

Fig.5.40 – Potência da onda ( $H_s=6\text{m}$ ;  $T_p=14\text{s}$ ; Oeste)

O quebramar destacado é atingido por ondas de altura significativa (Fig.5.36) de 3.6m e altura máxima (Fig.5.37) de 5.4m, sendo que estas diminuem a sotamar. A maior diferença em relação à situação anterior é que, nas presentes condições, com agitação oriunda de oeste, verifica-se que o quebramar destacado é mais eficiente na proteção da região a sul do esporão norte, no entanto, verifica-se o contrário em relação à zona a norte do esporão sul. Os efeitos de difração são também de fácil perceção.

O período de onda de pico (Fig.5.38) diminui a sotamar do quebramar destacado, mais pronunciadamente a sul do esporão norte. Ainda assim, a sua diminuição é ligeira, para cerca de 11.5s.

A direção média da onda (Fig.5.39) apenas se altera junto às estruturas de defesa costeira, nomeadamente a sotamar do quebramar, devido aos efeitos da difração, aproximando-se da direção de sudoeste.

O quebramar destacado é atingido com uma potência de onda (Fig.5.40) de 50kW/m, sendo evidente a sua influência na diminuição desta a sotamar.

Por último, analisam-se os resultados provenientes do *Sand Transport Module*.

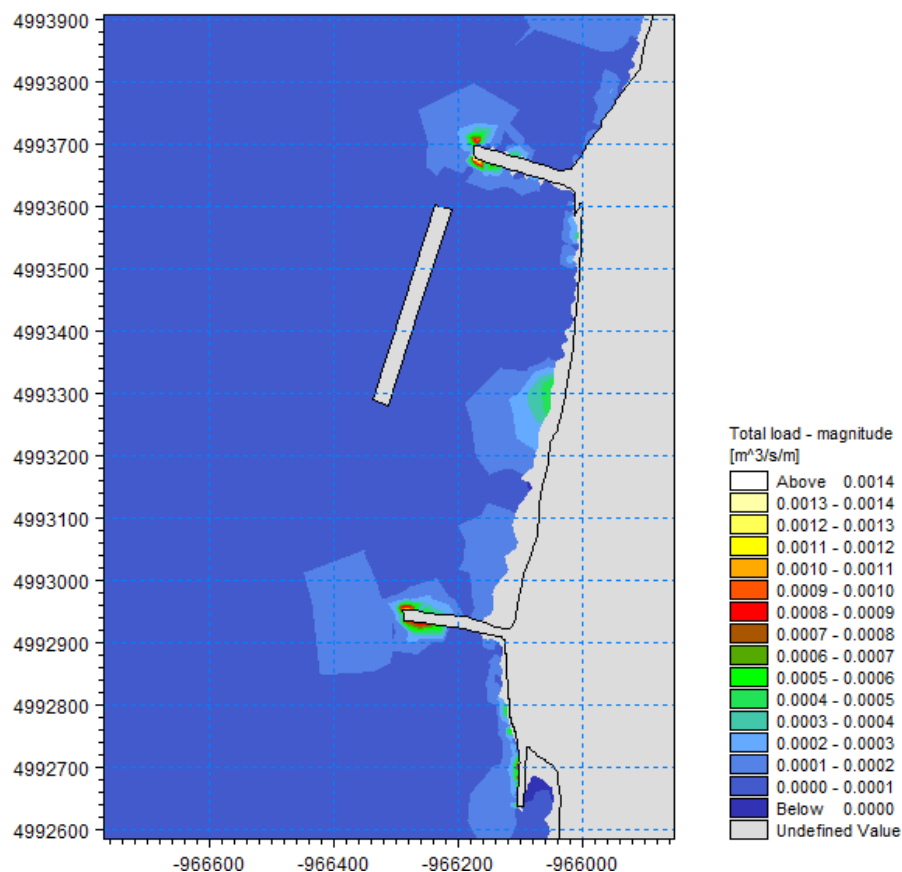


Fig.5.41 – Caudal sólido transportado (Hs=6m; Tp=14s; Oeste)

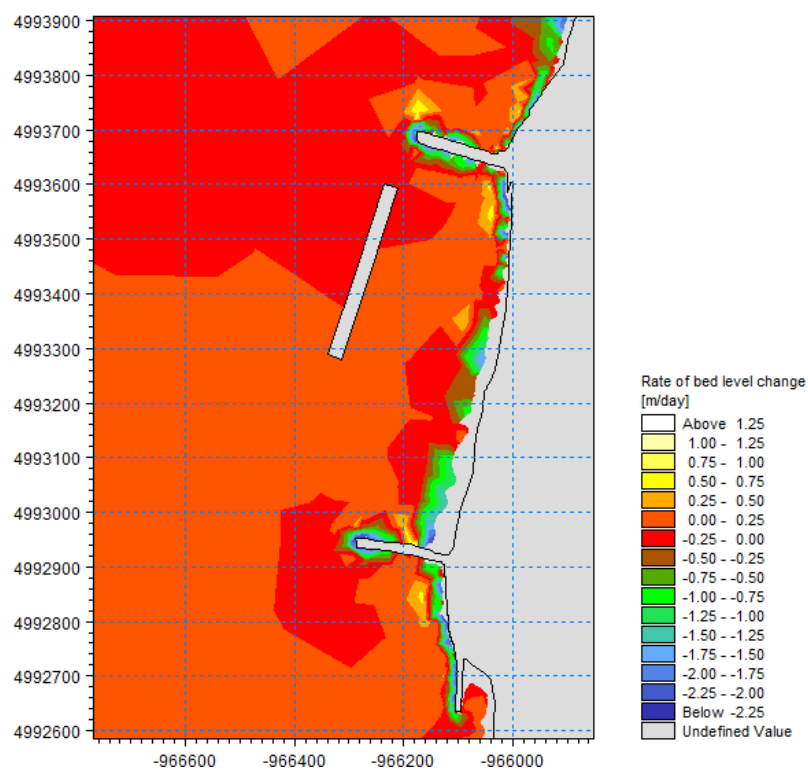


Fig.5.42 – Taxa de alteração do nível dos fundos (Hs=6m; Tp=14s; Oeste)

Entre esporões, o caudal sólido transportado (Fig.5.41) é maior nestas condições do que na anterior, tendo sentido de sul para norte, e a meia distância há uma intensificação do transporte de caudal sólido. No que diz respeito à taxa de alteração do nível dos fundos (Fig.5.42), a erosão é mais pronunciada a meia distância entre os esporões e um pouco mais a sul deste local, comparativamente com a situação anterior.

Em resumo, a solução apresentada de um quebramar destacado reduz significativamente a altura de onda a sotamar, como se previa, e consequentemente pode reduzir as erosões ocorridas na linha de costa entre esporões. Conclui-se também que o quebramar destacado tem pouca influência na proteção da zona mais a sul entre os esporões e, em condições de agitação médias, é pouco eficiente na proteção da região a sul do esporão norte. Relativamente às velocidades da corrente, esta é menor a sotamar do quebramar, mas entre este e o esporão norte cria-se uma zona de correntes de velocidade superior.

### 5.3.3. SIMULAÇÃO DA SITUAÇÃO DE UM SISTEMA DE DOIS QUEBRAMARES DESTACADOS

A implantação de um sistema de dois quebramares destacados é outra solução a ser estudada para condições de agitação marítima médias e de temporal. Assim, consideram-se dois quebramares com 150m de comprimento cada e 20m de largura de coroamento.

Os resultados que se seguem dizem respeito às condições de agitação marítima médias, em que se adotou uma altura significativa de 2.2m, período de pico de 11.4s e direção de noroeste, começando-se com a análise dos resultados relacionados com o nível médio da água e as correntes através do *Hydrodynamic Module*.

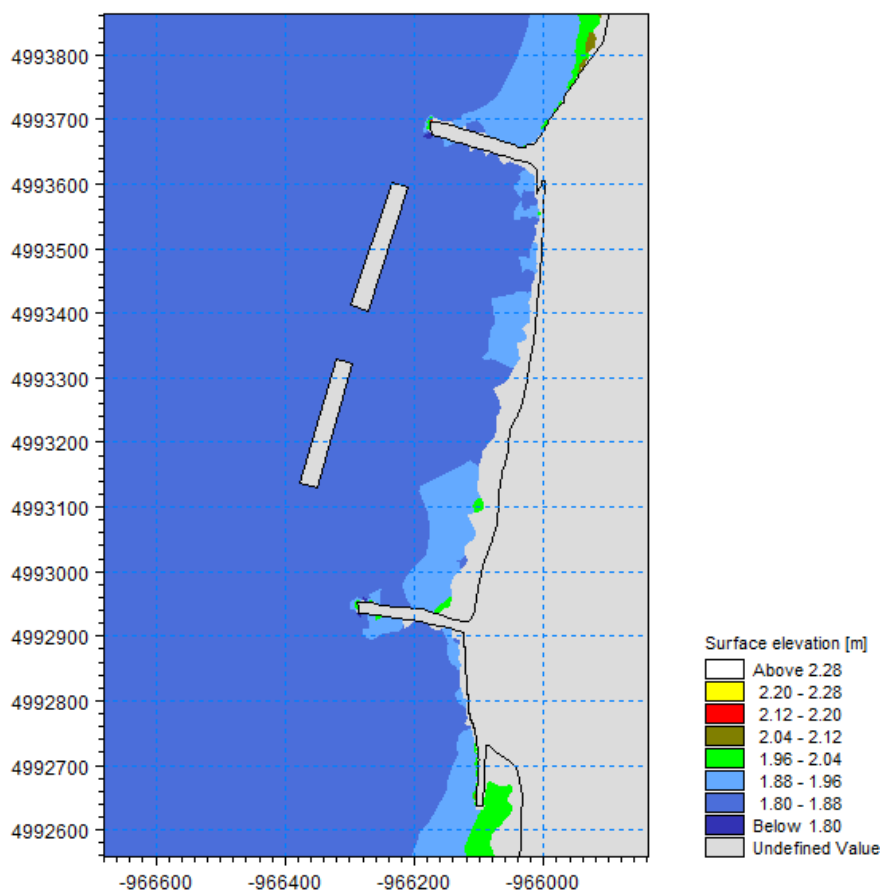


Fig.5.43 – Nível médio da água, ao Z.T. (Hs=2.2m; Tp=11.4s; Noroeste)

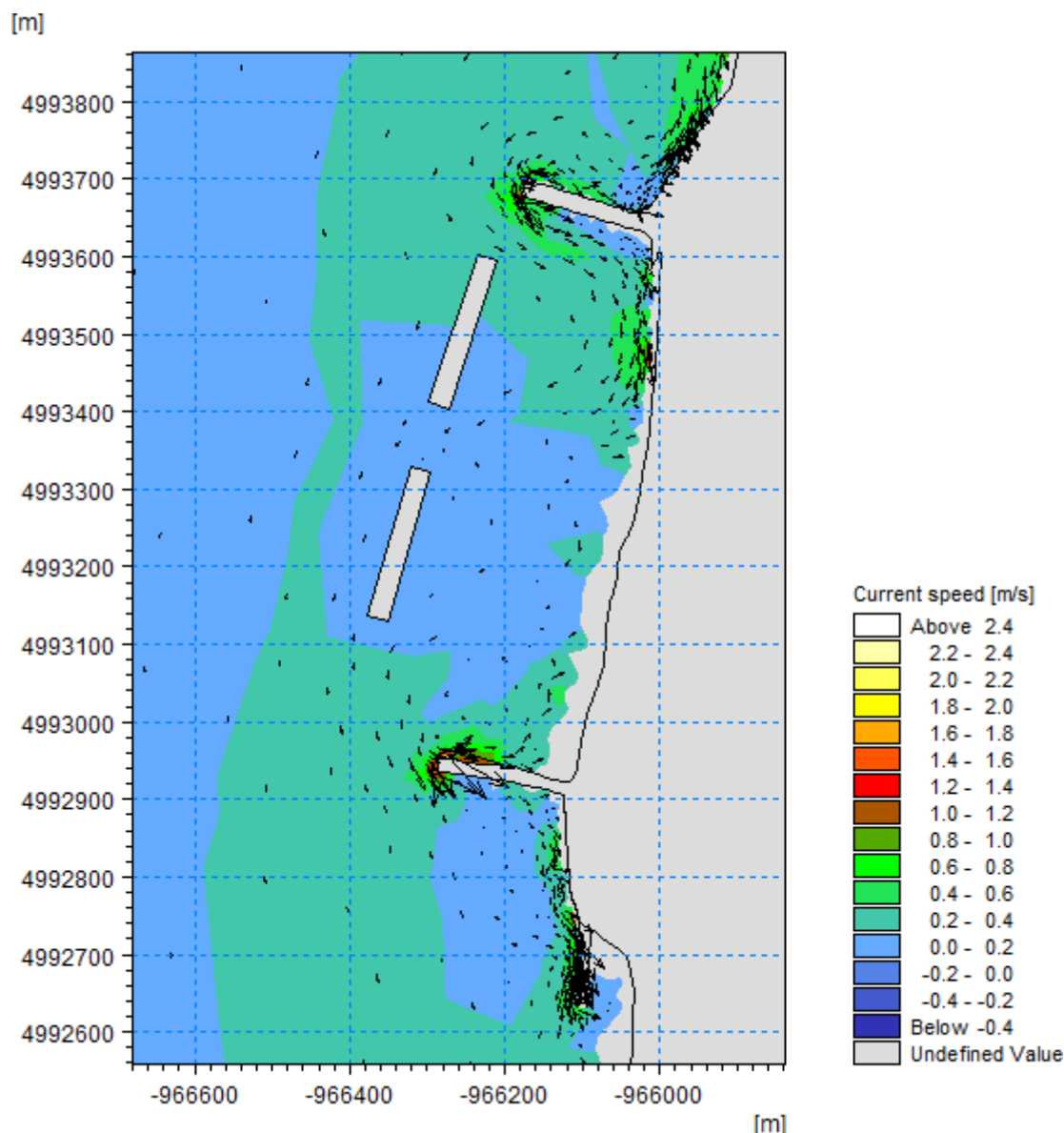


Fig.5.44 – Velocidade da corrente e respectivos vetores ( $H_s=2.2m$ ;  $T_p=11.4s$ ; Noroeste)

A presença dos quebramares destacados faz com que, ao contrário da situação de referência, a sotamar destes, o nível médio da água (Fig.5.43) praticamente não se altere.

Relativamente à velocidade da corrente (Fig.5.44), a sotamar das estruturas, esta é menor, como seria expectável, mas a sul do esporão norte, a velocidade da corrente é superior, assim como acontecia na situação anterior.

Entre os esporões, o sentido dos vetores velocidade (Fig.5.44) é variável, regendo-se pelos fenómenos de difração originados pelas estruturas de defesa costeira. Maioritariamente o sentido da corrente é de norte para sul, mas com algumas alterações, justificadas pelos tais efeitos de difração, em que o sentido se aproxima da direção sul e este.

De seguida, serão avaliados os parâmetros referentes ao *Spectral Wave Module*, nomeadamente altura, período, direção e potência de onda.



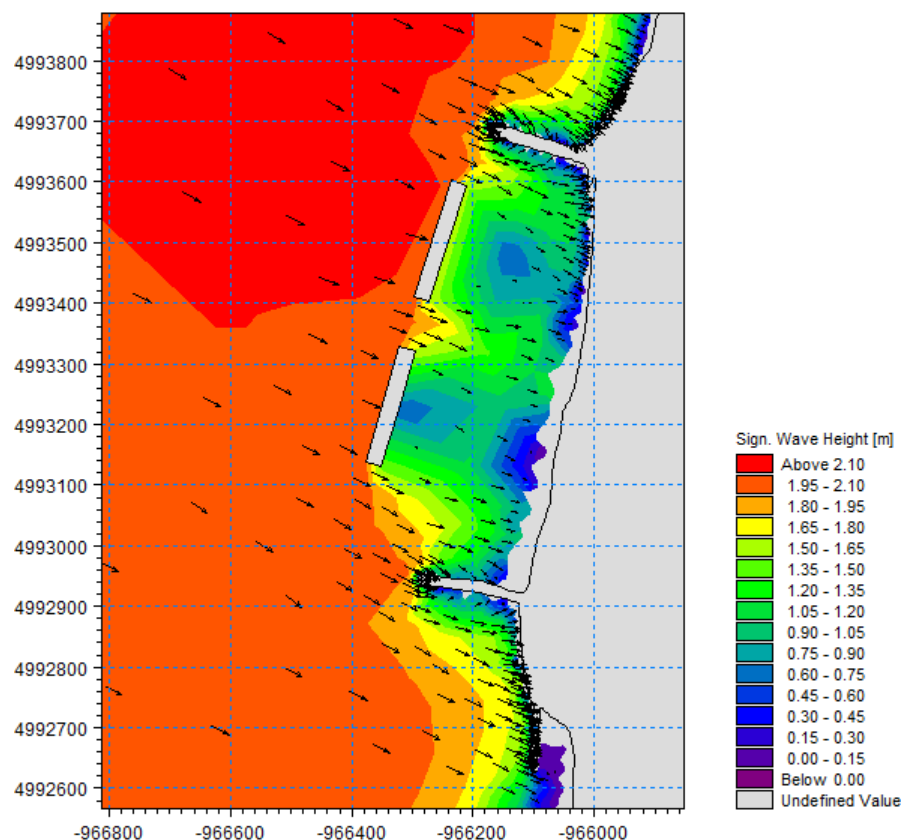


Fig.5.45 – Altura de onda significativa e vetores representativos da direção de onda ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

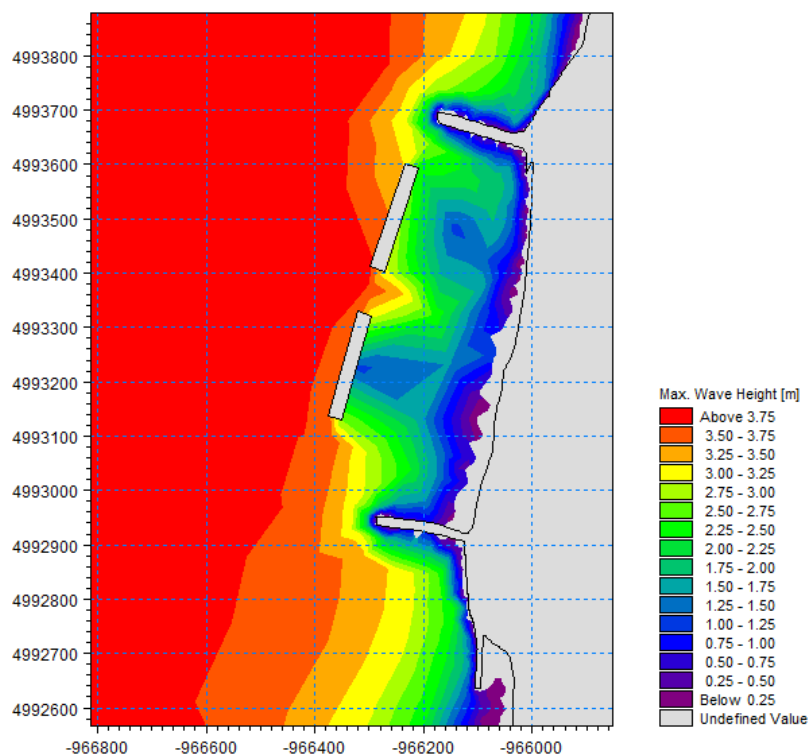


Fig.5.46 – Altura de onda máxima ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

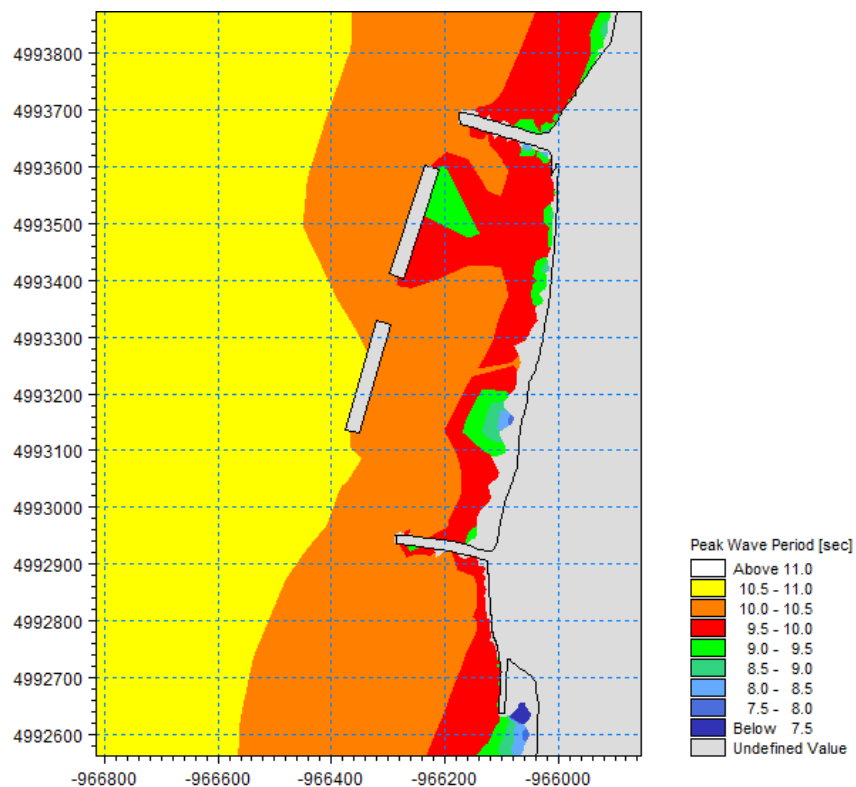


Fig.5.47 – Período da onda de pico ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

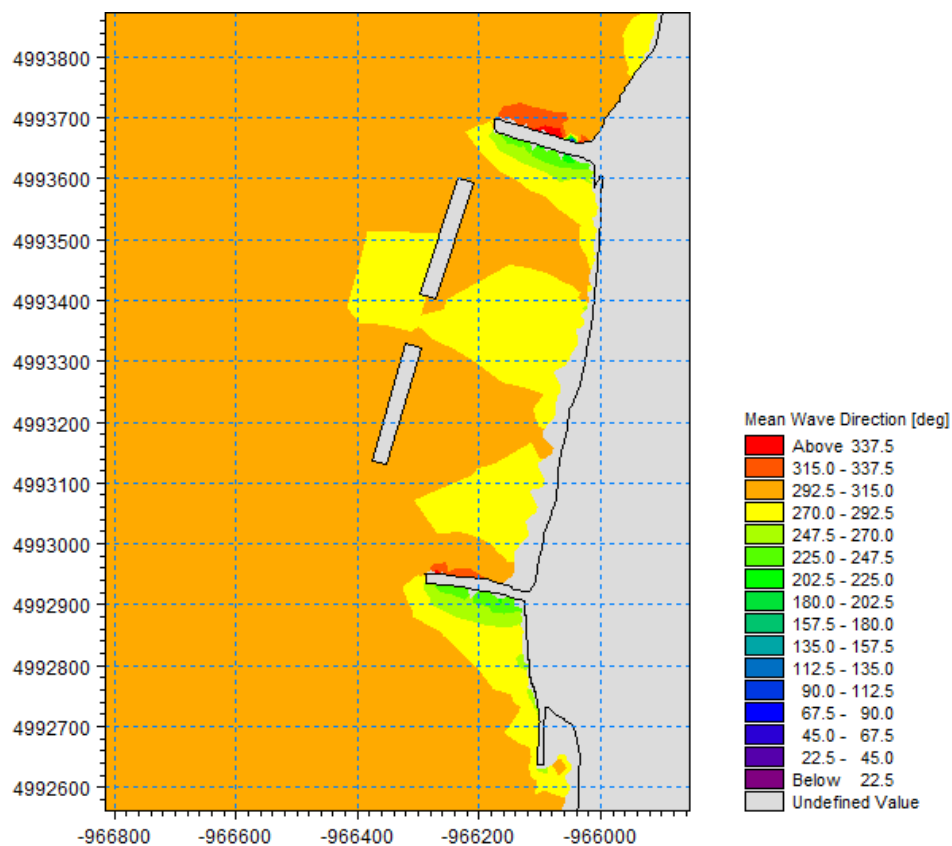
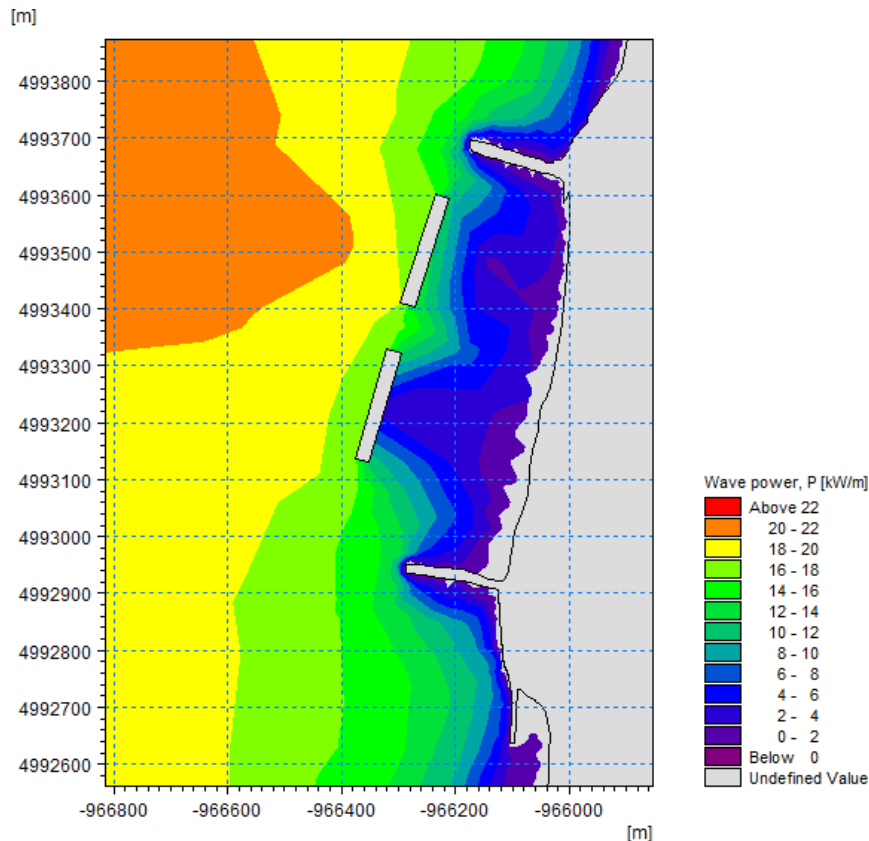


Fig.5.48 – Direção média da onda ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

Fig.5.49 – Potência da onda ( $H_s=2.2\text{m}$ ;  $T_p=11.4\text{s}$ ; Noroeste)

Segundo as figuras 5.45 e 5.46, ambos os quebramares são atingidos por ondas com uma altura significativa de cerca de 2m e uma altura máxima de quase 4m, sendo nesta situação também bem clara a importância dos quebramares destacados na diminuição da altura de onda a sotamar. Contudo, comparativamente com a situação anterior, a sotamar a diminuição da altura de onda é menor. Ainda assim, como seria de esperar, a proteção da região a norte do esporão sul é mais eficiente.

O período de pico, representado na Fig.5.47, diminui a sotamar dos quebramares, mas esta diminuição é também menor, sendo que, no caso do quebramar destacado mais a sul, este praticamente não se altera.

Os fenómenos de difração provocados pelos quebramares destacados são claramente visíveis em todas as figuras apresentadas, devido às aberturas entre as estruturas de defesa costeira.

Na Fig.5.48, é clara a direção dominante, de noroeste, havendo alterações nas zonas onde surgem os efeitos de difração referidos, em que a direção se aproxima de oeste.

Relativamente à potência das ondas (Fig.5.49), esta diminui a sotamar dos quebramares destacados, mas, assim como se tem verificado para os outros parâmetros, esta diminuição é menor.

O último módulo a ser analisado é o *Sand Transport Module* relacionado com o caudal sólido transportado e as alterações do nível dos fundos.

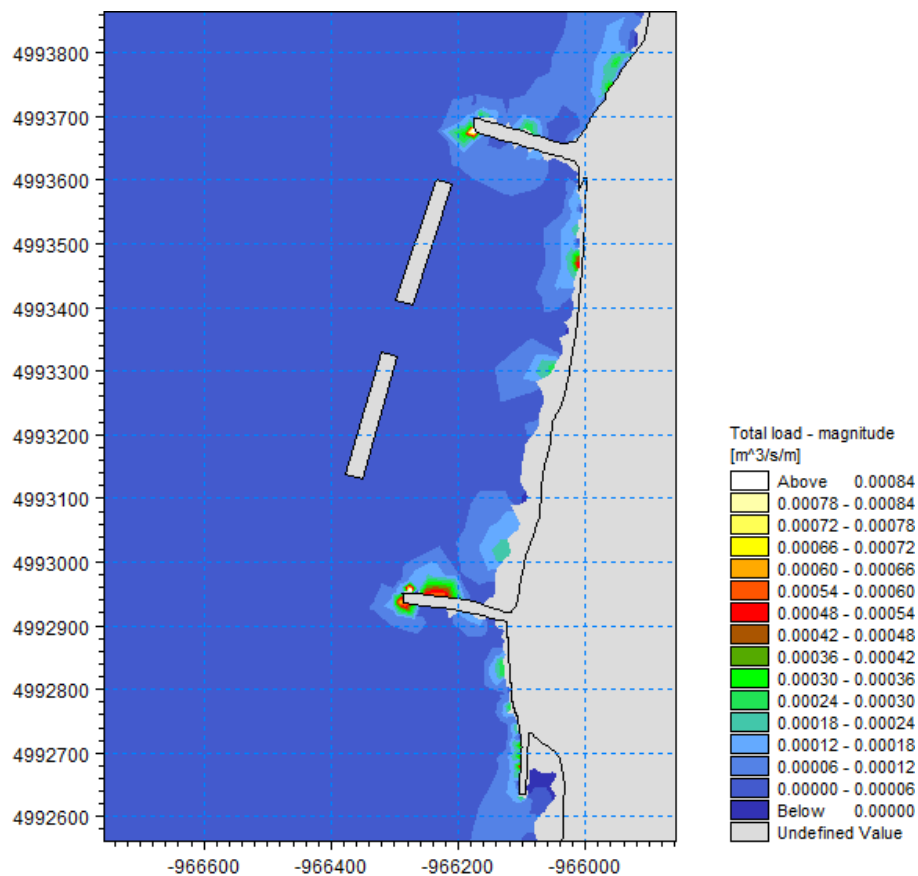


Fig.5.50 – Caudal sólido transportado (Hs=2.2m; Tp=11.4s; Noroeste)

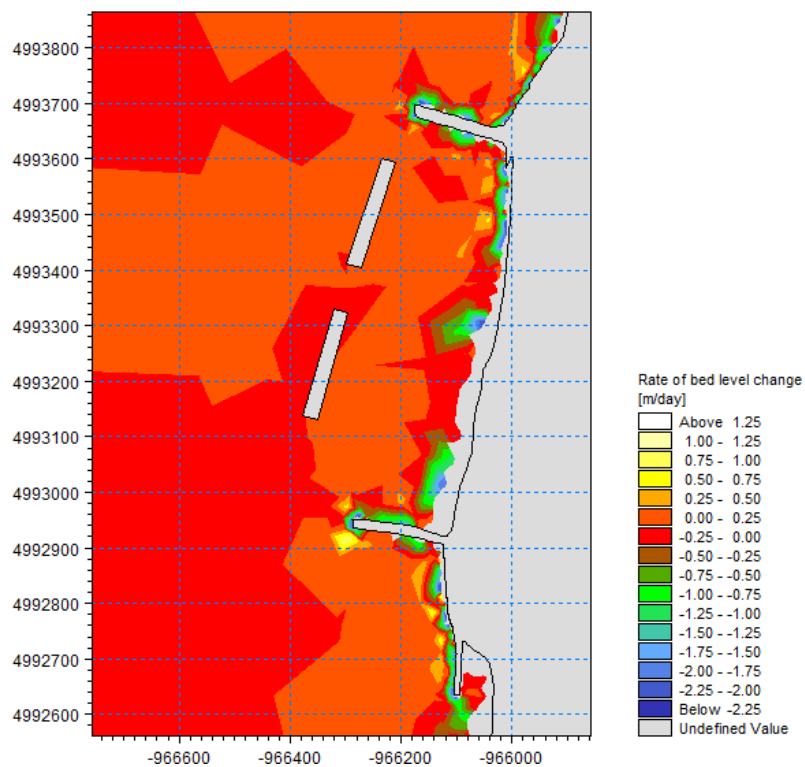


Fig.5.51 – Taxa de alteração do nível dos fundos (Hs=2.2m; Tp=11.4s; Noroeste)

O caudal sólido transportado, representado na Fig.5.50, é semelhante à situação anterior, exceto a meia distância entre os esporões, em que este é superior, devido à abertura existente entre os dois quebramares destacados.

Relativamente à taxa de alteração do nível do leito (Fig.5.51), as conclusões tiradas vão de encontro ao supracitado, onde nesse mesmo local se observa uma maior erosão.

Os resultados relativos às condições de temporal são abordados de seguida, em que as condições adotadas são uma altura de onda significativa de 6m, um período de pico de 14s e direção de oeste.

Nas figuras 5.52 e 5.53, apresenta-se a variação do nível médio da água e da velocidade das correntes.

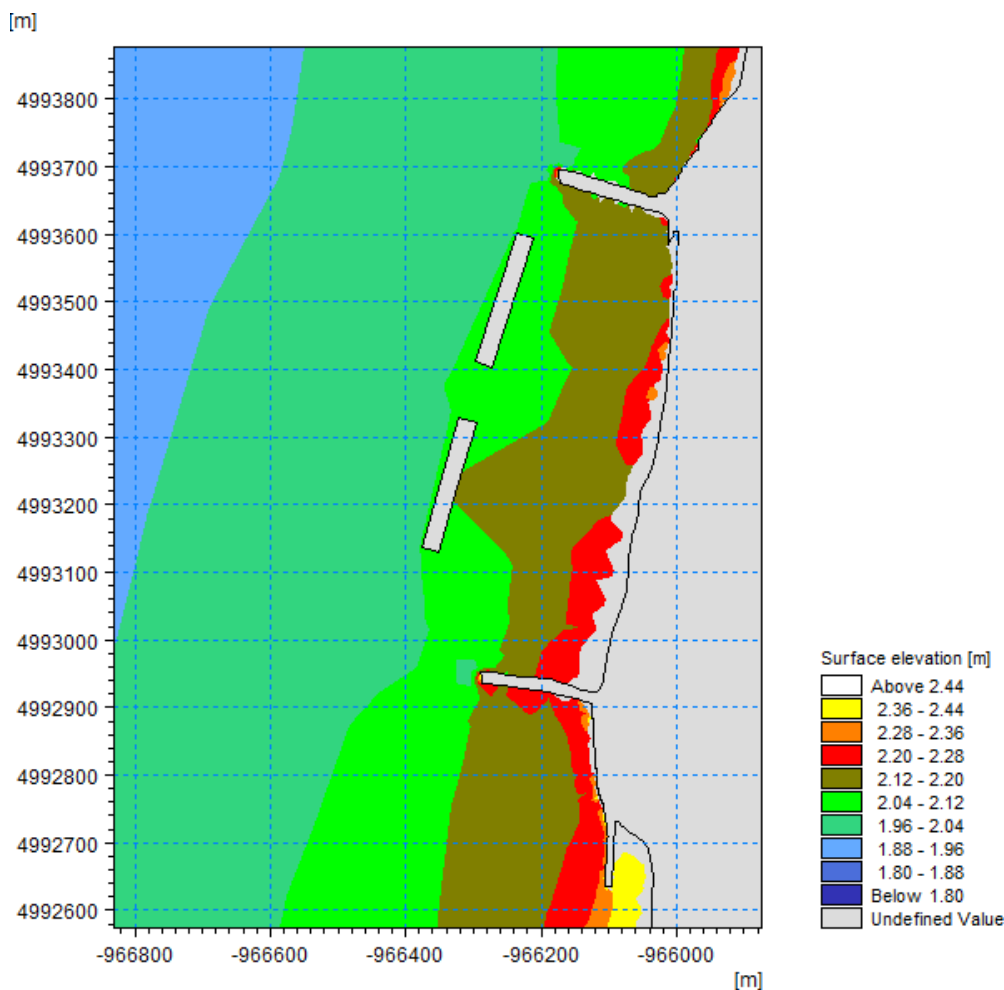


Fig.5.52 – Nível médio da água, ao Z.T. (Hs=6m; Tp=14s; Oeste)

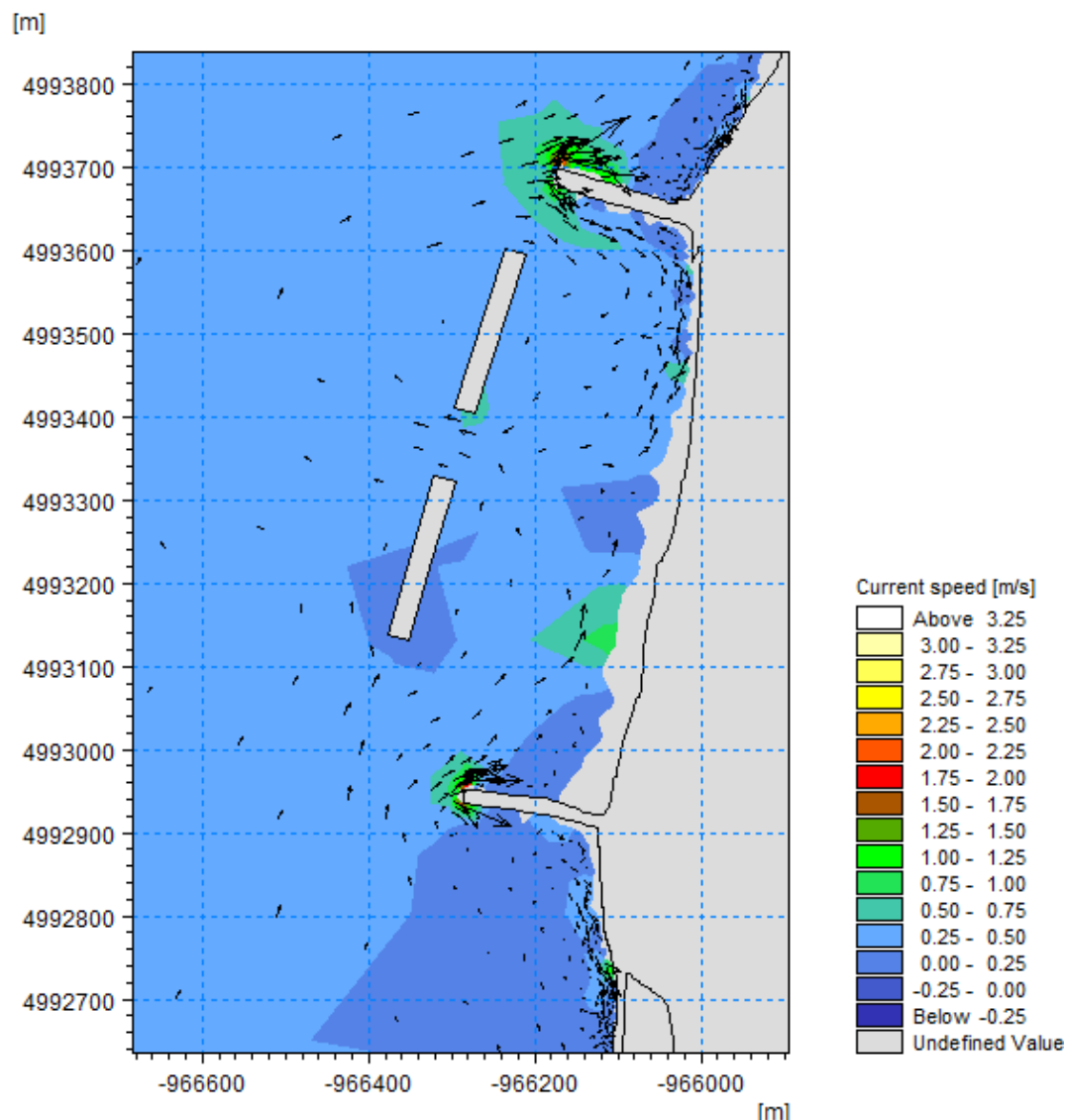


Fig.5.53 – Velocidades da corrente e respectivos vetores ( $H_s=6m$ ;  $T_p=14s$ ; Oeste)

Nestas condições de temporal, os quebra-mares destacados praticamente não alteram o nível médio da água (Fig.5.52) observado na situação de referência, apenas a sotamar do quebra-mar mais a sul se verifica um ligeiro aumento desse nível.

Ambos os quebra-mares destacados têm pouca influência na alteração da velocidade da corrente (Fig.5.53) a sotamar, apenas o quebra-mar sul reduz ligeiramente essa velocidade em torno do mesmo. No entanto, entre o esporão norte e o quebra-mar norte e entre o quebra-mar sul e o esporão sul cria-se um canal de corrente que origina velocidades de corrente superiores junto à linha de costa, principalmente neste último caso. Como se tem vindo a constatar nas presentes condições de agitação, o sentido da corrente é de sul para norte, exceto junto às estruturas de proteção costeira, em que os vetores corrente tendem a contorná-las, sendo perceptíveis os fenómenos de difração nas aberturas entre as diferentes estruturas.

As figuras que se seguem representam os parâmetros de onda: altura significativa e máxima, direção, período e potência, referentes ao *Spectral Wave Module*.

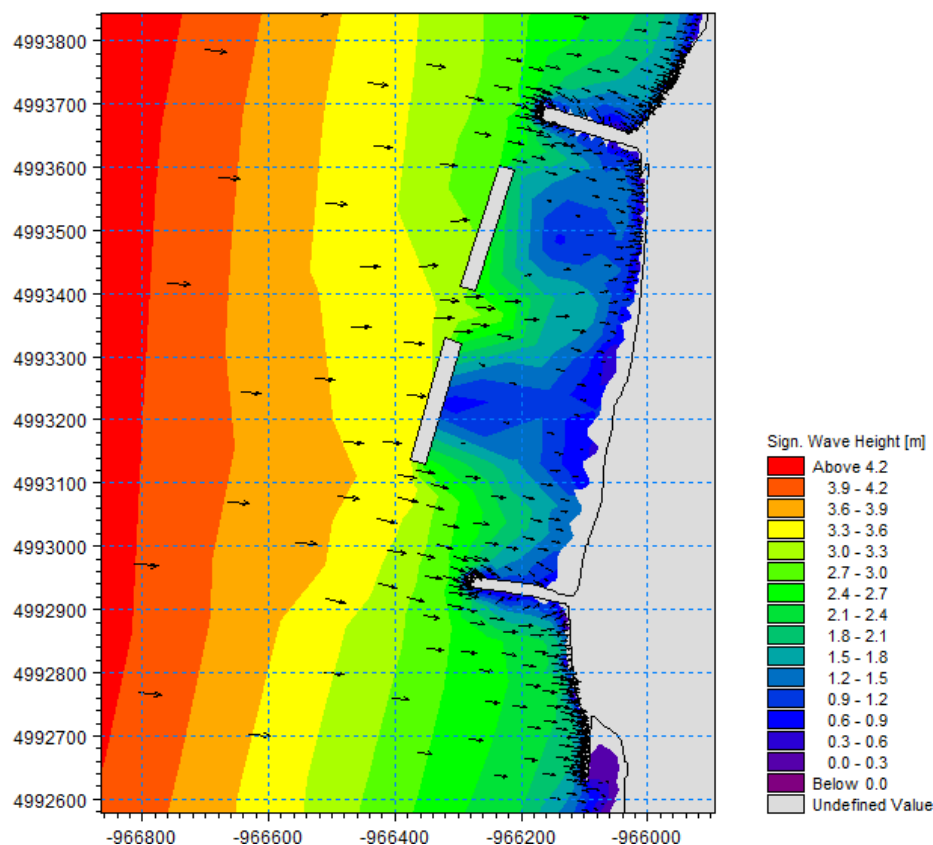


Fig.5.54 – Altura de onda significativa e vetores representativos da direção de onda ( $H_s=6m$ ;  $T_p=14s$ ; Oeste)

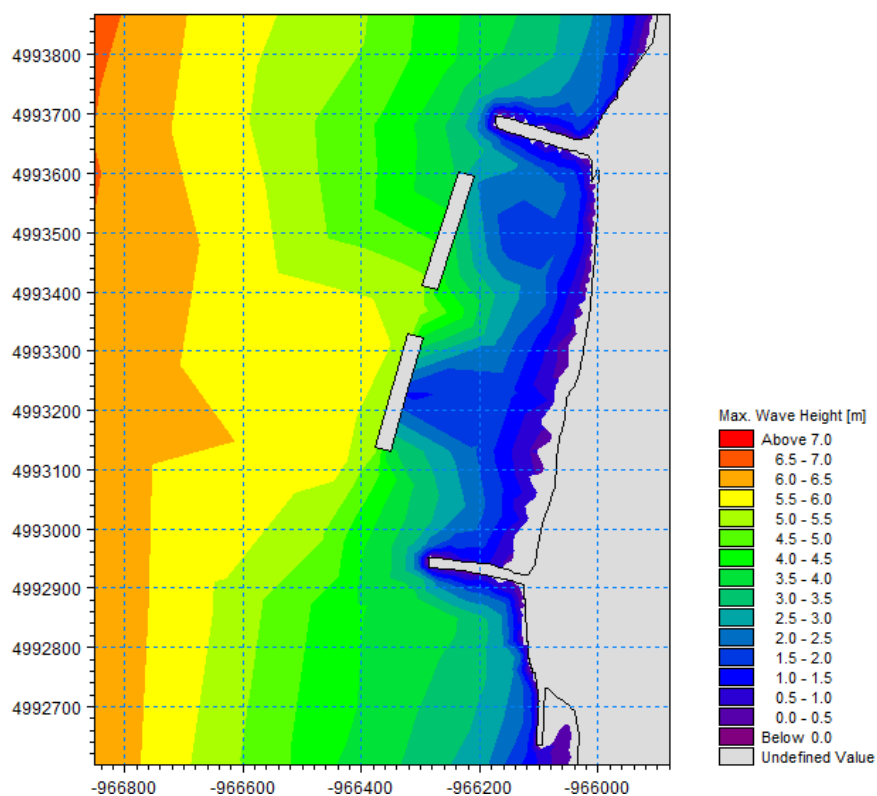


Fig.5.55 – Altura de onda máxima ( $H_s=6m$ ;  $T_p=14s$ ; Oeste)

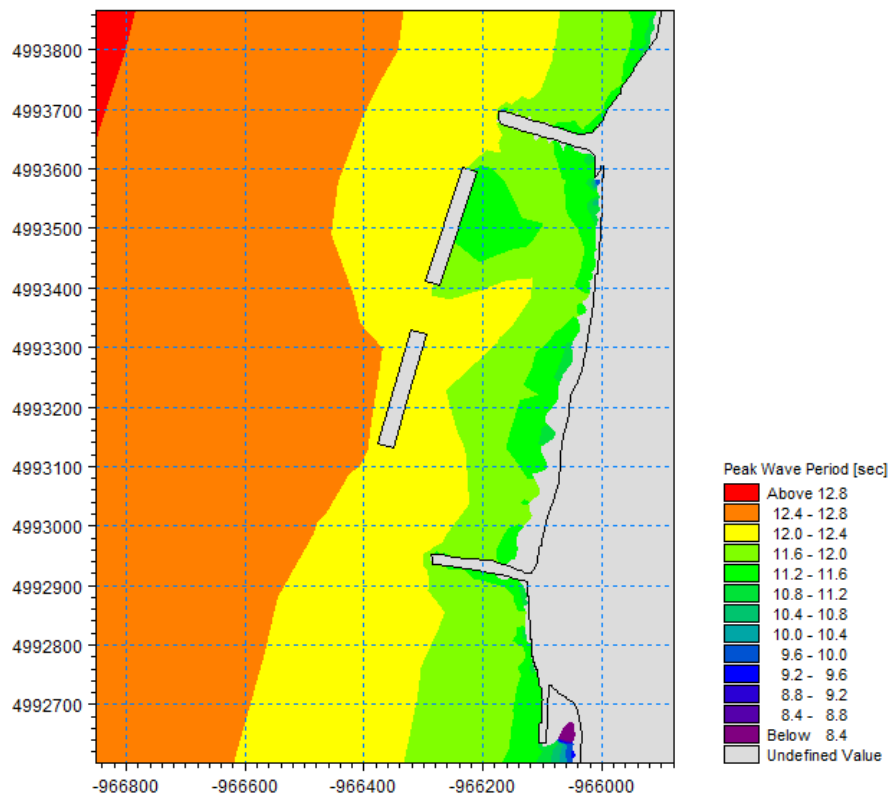


Fig.5.56 – Período da onda de pico ( $H_s=6m$ ;  $T_p=14s$ ; Oeste)

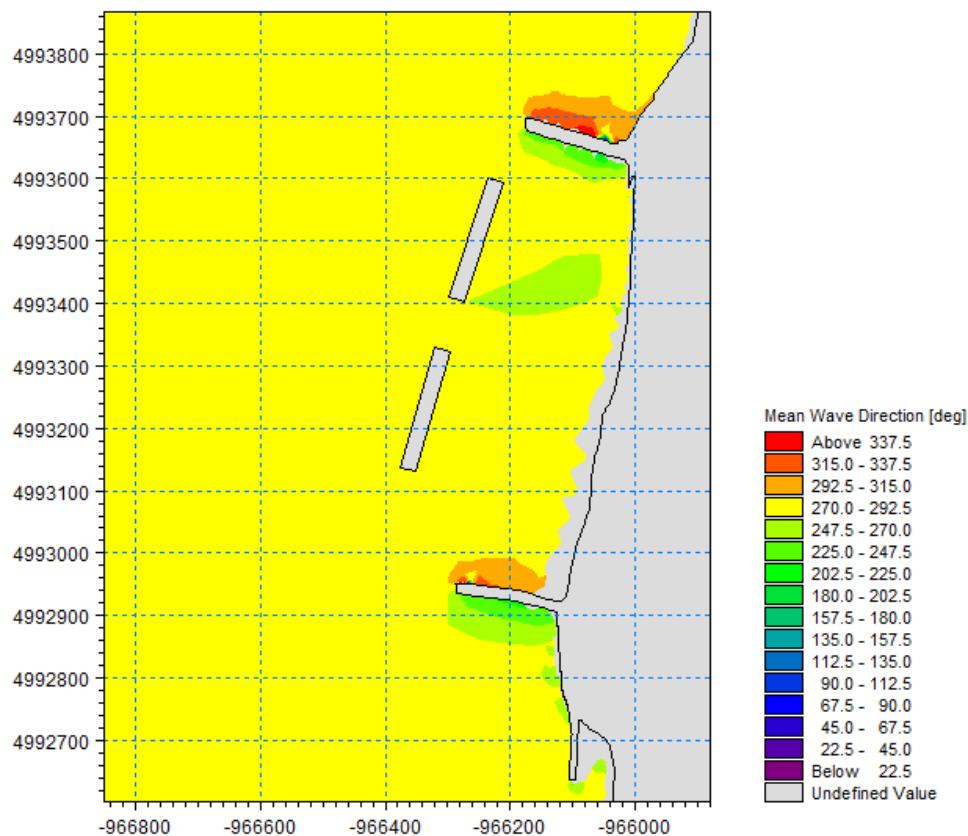


Fig.5.57 – Direção média da onda ( $H_s=6m$ ;  $T_p=14s$ ; Oeste)



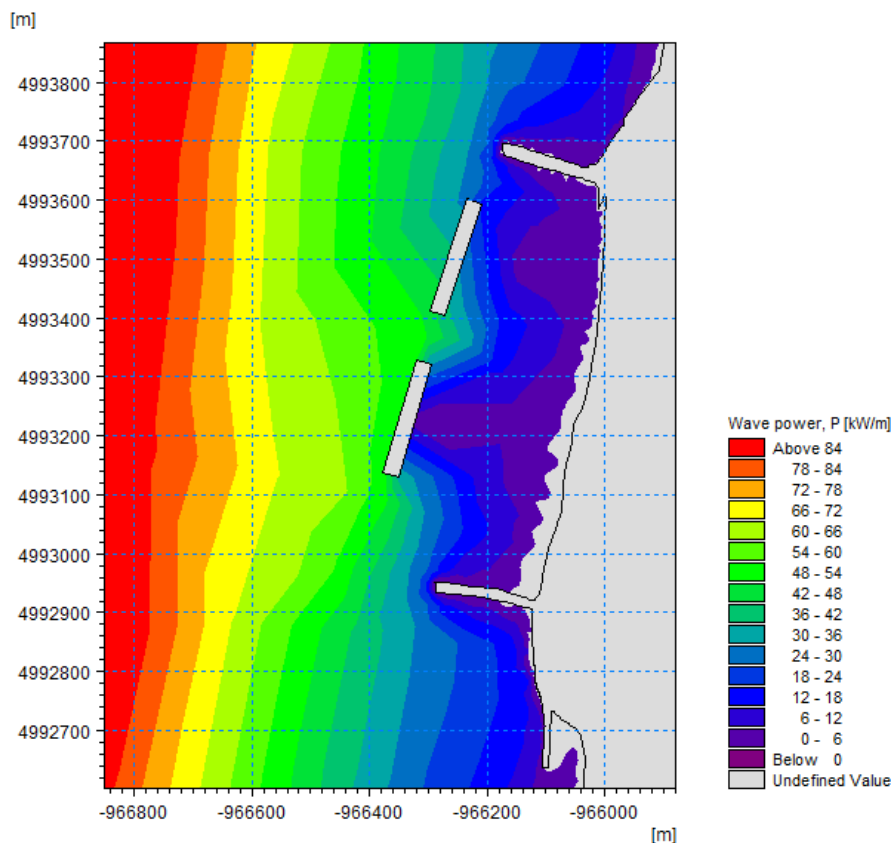


Fig.5.58 – Potência da onda ( $H_s=6m$ ;  $T_p=14s$ ; Oeste)

Nas condições de agitação de temporal, os quebra-mares destacados são atingidos por uma altura de onda significativa (Fig.5.54) de 3.2m e máxima (Fig.5.55) de 5.4m. Como era de prever, as alturas de onda diminuem a sotamar dos quebra-mares destacados e os fenómenos de difração mantêm-se. O mesmo acontece relativamente à potência da onda (Fig.5.58) que diminui a sotamar.

No que diz respeito ao período de pico (Fig.5.56), este é afetado praticamente apenas pelo quebramar norte que provoca uma diminuição para cerca de 11.5s.

A direção de onda média (Fig.5.57) pouco se altera, apenas junto ao quebramar norte se aproxima de sul, devido novamente aos efeitos de difração.

Por fim, analisam-se os parâmetros relativos ao *Sand Transport Module*, nomeadamente o caudal sólido transportado e a taxa de alteração do nível dos fundos.

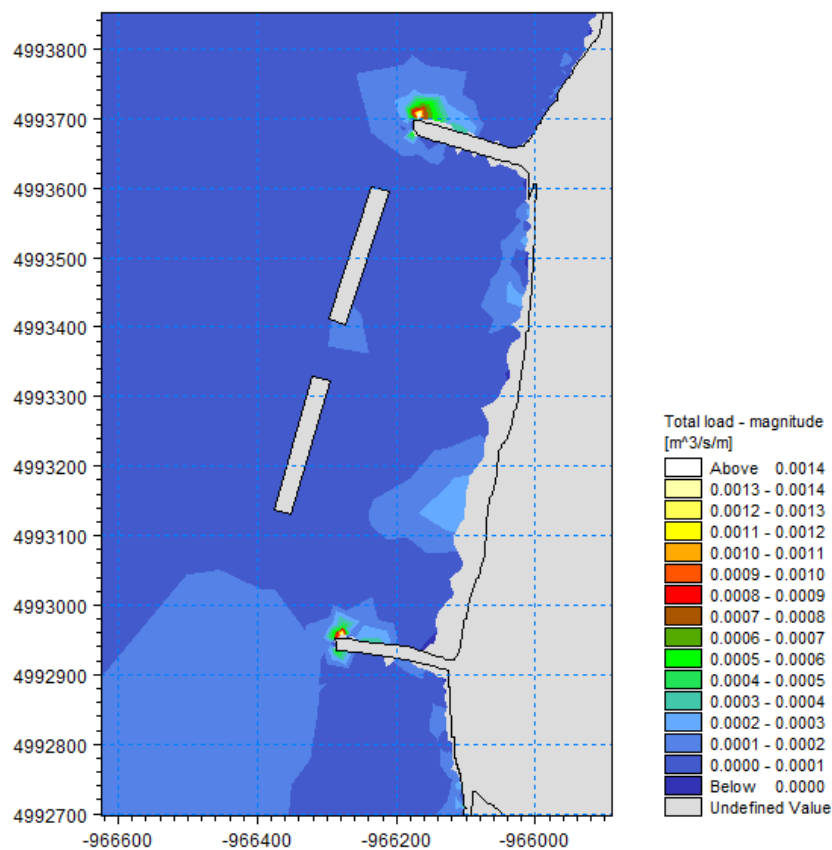


Fig.5.59 – Caudal sólido transportado (Hs=6m; Tp=14s; Oeste)

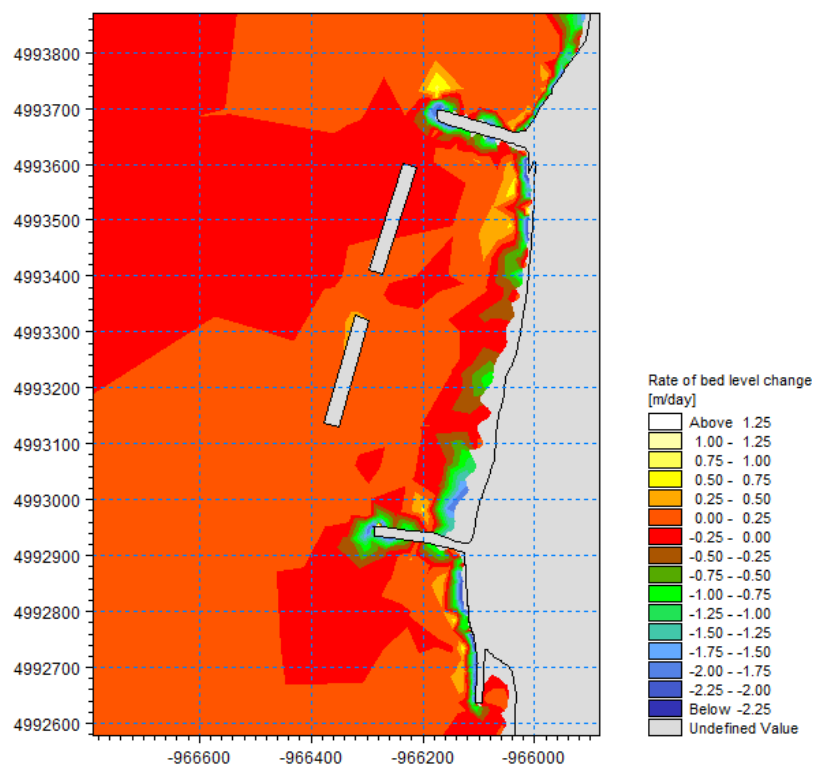


Fig.5.60 – Taxa de alteração do nível dos fundos (Hs=6m; Tp=14s; Oeste)

Em condições de temporal, o caudal sólido transportado (Fig.5.59) é aproximadamente constante, exceto a sul do esporão norte e a sotamar do quebramar sul, junto à linha de costa, onde as aberturas entre estruturas provocam o aumento do caudal sólido transportado nesses mesmos locais.

Relativamente à taxa de alteração do nível dos fundos (Fig.5.60), nota-se que as erosões ocorrem aproximadamente nos mesmos locais mas um pouco mais intensificadas.

Sintetizando o que foi exposto, observou-se uma diminuição da altura e potência da onda a sotamar dos quebramares destacados, como previsto, embora menor que na situação anterior. O facto de existirem dois quebramares significa que as alterações na linha de costa consequentes dos mesmos abrangem uma área maior, surtindo, assim, efeito em quase toda a linha de costa entre os esporões. Contudo, o espaço existente entre estas duas estruturas origina o agravamento de situações de erosão a meia distância dos esporões.

#### 5.3.4. SIMULAÇÃO DE UM EVENTO DE DUAS SEMANAS

De forma a complementar o estudo feito anteriormente, foi efetuada a simulação de um evento com a duração de duas semanas, em condições de agitação marítima médias caracterizadas por uma altura de onda de 2.2m, período de pico de 11.4s e direção de noroeste. Este estudo pretende avaliar as alterações morfológicas dos fundos, analisando possíveis erosões e acreções, sendo testadas mais uma vez ambas as soluções propostas.

Inicialmente, foi analisada a alteração das cotas dos fundos ao fim de duas semanas para a situação de referência, Fig.5.61, onde são visíveis as zonas de acreção e erosão.

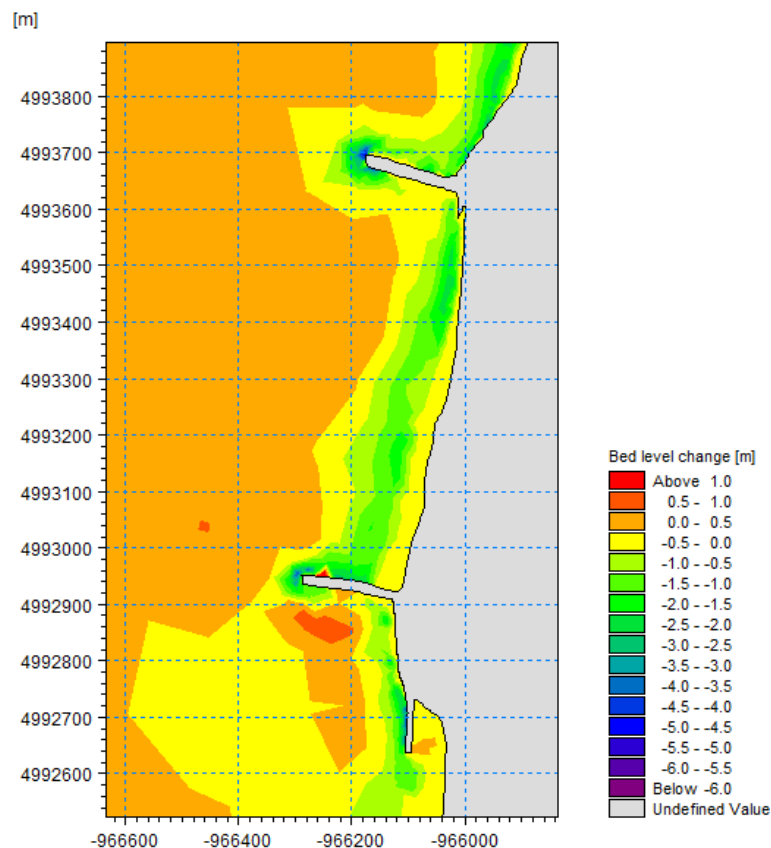


Fig.5.61 – Alteração das cotas dos fundos (situação de referência)

Os fenómenos de erosão ao longo da linha de costa são bastante notórios, exceto a sotamar do esporão sul, onde se deteta uma zona de acreção, contrariamente ao expectável. O fenómeno de erosão abrange uma grande área a norte de ambos os esporões, no entanto, a sul do esporão norte, embora seja de difícil perceção, há uma zona em que o nível de erosão é superior.

Ao largo, são visíveis zonas de pequenas acreções e erosões, pelo que o nível dos fundos sofre alterações pouco expressivas.

Na Fig. 5.62, apresenta-se a diferença entre as cotas dos fundos inicial e após duas semanas, quando submetido a condições de agitação médias. De encontro ao supracitado, é visível a diminuição da cota dos fundos junto à linha de costa, mais pronunciada a norte dos esporões e a sul do esporão norte.

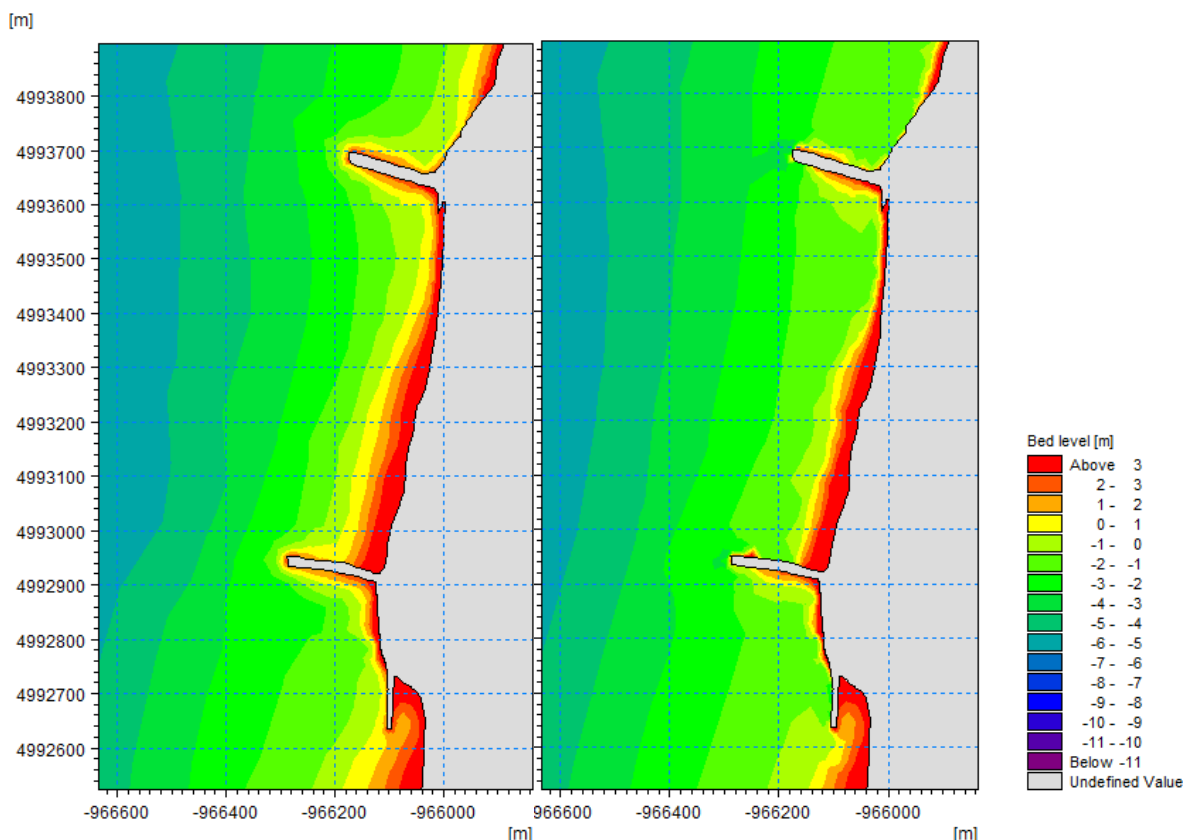


Fig.5.62 – Cota dos fundos inicial (à esq.) e após duas semanas (à dir.), ao Z.T.

Na Fig.5.63, ilustra-se a alteração dos fundos no caso da presença de um quebramar destacado.

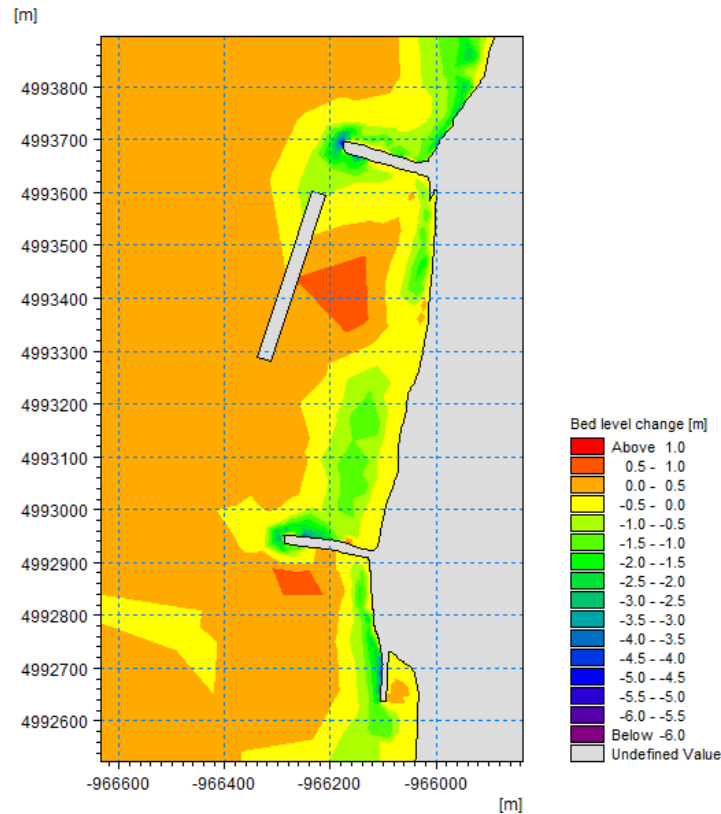


Fig.5.63 – Alteração da cota dos fundos (situação de um quebramar destacado)

Facilmente se verifica o início da acumulação de sedimentos a sotamar do quebramar destacado, que favorece a criação de um tómbolo. No entanto, é preciso cautela nas conclusões acerca da possível formação de um tómbolo, tendo presente as limitações da modelação numérica, pelo que a modelação física é imprescindível para se perceber se esta situação ocorreria na realidade. A sotamar do quebramar, junto à linha de costa, é também notória uma diminuição das erosões.

Outro aspeto a destacar são os fenómenos de erosão observados na extremidade norte do quebramar destacado, que não eram visíveis na situação de referência e que podem conduzir à ocorrência de infraescavações.

Também junto à linha de costa, a cerca de meia distância entre os esporões, é visível um ligeiro aumento das erosões, representativas das consequências negativas da implantação do quebramar destacado.

Na Fig.5.64, apresentam-se as cotas dos fundos iniciais e após duas semanas, onde é possível observar certos aspetos que vão de encontro ao referido acima. Embora seja de difícil percepção, observa-se que a sotamar da estrutura a cota dos fundos aumenta e a norte do esporão sul esta diminui, para além de que, na extremidade norte do quebramar destacado, esse nível é menor.

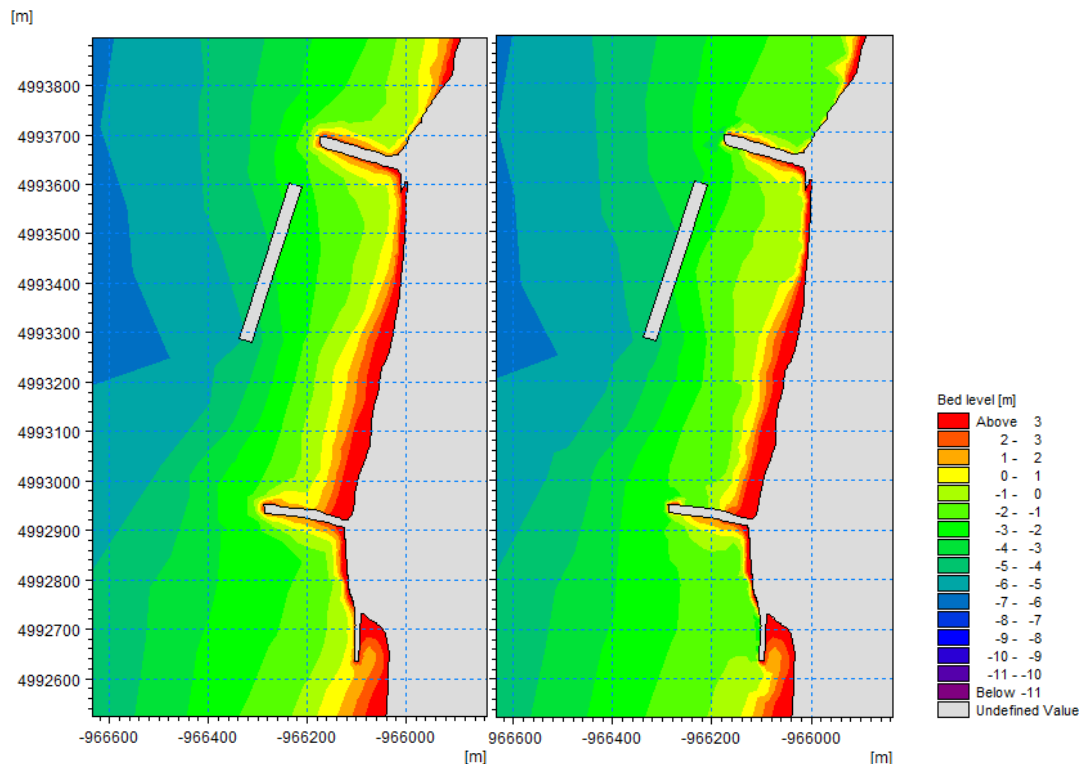


Fig.5.64 – Cota dos fundos inicial (à esq.) e após duas semanas (à dir.), ao Z.T.

Por último, são analisadas as alterações morfológicas no caso da solução de dois quebramares destacados, durante duas semanas, em condições de agitação marítima médias, Fig.5.65.

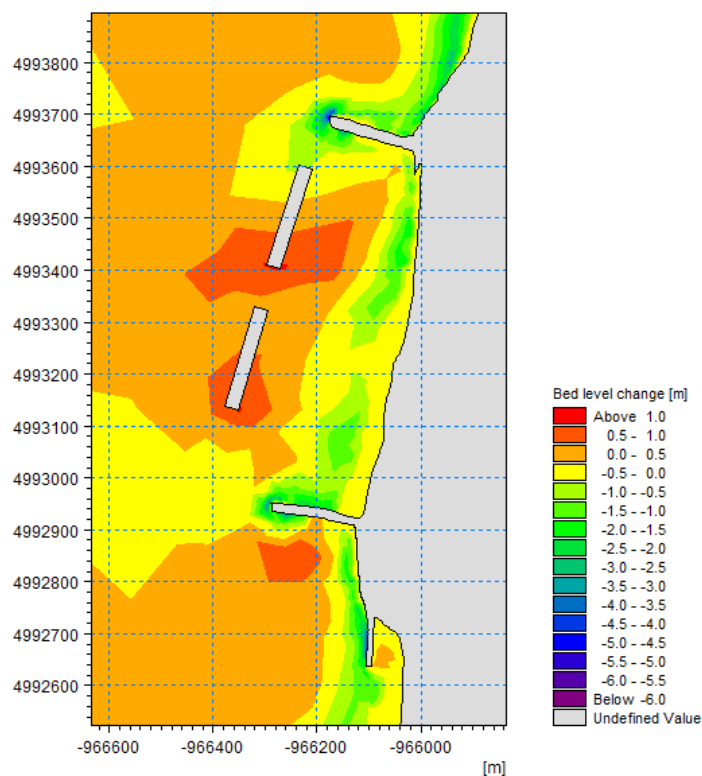


Fig.5.65 – Alterações das cotas dos fundos (situação com dois quebramares destacados)

A acumulação de sedimentos em torno de ambos os quebramares destacados é evidente. A sotamar destas estruturas poderão ser eventualmente criadas condições para a formação de um tómbolo, assim como referido na situação anterior.

No entanto, é também de destacar as erosões que podem ocorrer na extremidade norte do quebramar norte, conduzindo a infraescavações, contrariamente ao que acontece na extremidade sul de ambos os quebramares onde são visíveis fenómenos de acreção.

Comparativamente com a situação de referência, junto à linha de costa, as zonas de erosão mantêm-se semelhantes, contudo o nível de erosão é menor, excetuando-se a região a sul do esporão norte, onde as erosões diminuem.

Na Fig.5.66, ilustra-se a cota dos fundos inicial e após duas semanas, onde se verifica a diminuição da cota junto à linha de costa entre os esporões, contudo a sotamar dos quebramares destacados e a sul do esporão norte acontece o contrário.

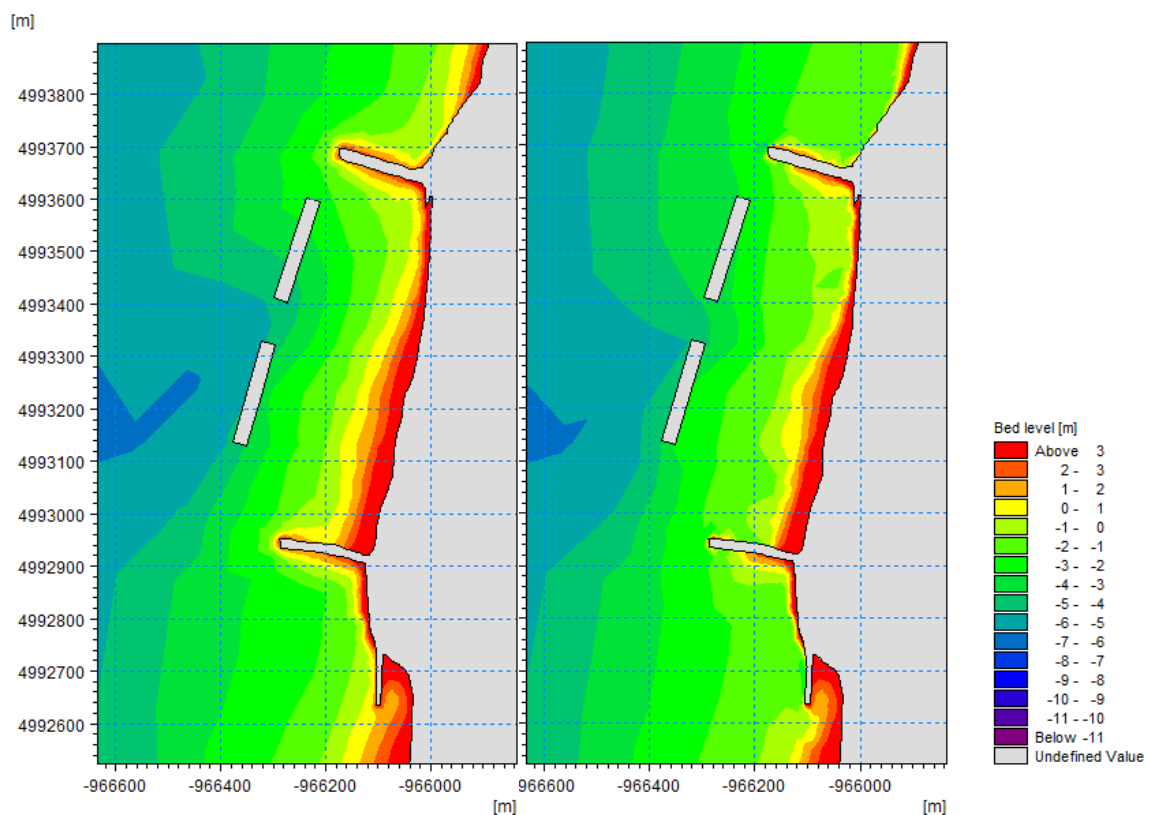


Fig.5.66 – Cota dos fundos inicial (à esq.) e após duas semanas (à dir.), ao Z.T.

Nas figuras correspondentes às diversas situações estudadas, observam-se algumas diferenças em zonas em que as estruturas destacadas implantadas não teriam, em princípio, qualquer influência. Estas diferenças devem-se ao facto de existirem pequenas dissimilaridades entre as malhas de cada uma das situações, visto estas serem geradas automaticamente, tornando-se mais densas em torno das fronteiras, como referido inicialmente no presente capítulo.





# 6

## CONCLUSÕES

### 6.1. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS

As simulações efetuadas, utilizando o *software* MIKE, possibilitaram tecer várias conclusões acerca dos fenômenos que ocorrem atualmente na zona em estudo, assim como os que ocorreriam com a presença de um ou de dois quebramares destacados.

No estudo da situação de referência verificou-se que, em condições de agitação médias, os esporões contribuem para a diminuição das velocidades da corrente a sul e que o caudal sólido transportado é maior a norte destes e menor a sul. Em ambas as condições de agitação, são detetados fenômenos de erosão em quase toda a linha de costa, sendo mais pronunciados em torno dos esporões, na estrutura longitudinal aderente sul e a meia distância entre os esporões. De realçar a área junto à cabeça dos esporões e à estrutura longitudinal aderente sul, onde há uma maior concentração de energia de onda, assim como a norte e a sul do esporão norte, onde as ondas atingem a marginal, rebentando junto desta, podendo conduzir a galgamentos nestas zonas. Os fenômenos de refração e difração ocorridos são claros. O período de pico da onda não sofre grandes alterações.

A implantação do quebramar destacado reduz significativamente a altura de onda a sotamar, bem como a energia de onda que atinge a costa na região entre os esporões. No entanto, apesar das velocidades de corrente serem também menores a sotamar, a presença desta estrutura origina um canal de velocidades de corrente superiores junto à linha de costa, a sul do esporão norte, que poderão prejudicar a atividade balnear, ocorrendo também um aumento das velocidades a meia distância entre os esporões, em condições de temporal. Como era de prever, são originados fenômenos de difração entre as diferentes estruturas de proteção costeira. Com a presença do quebramar destacado, observa-se também a diminuição de erosão entre os esporões.

O sistema de dois quebramares destacados foi outra solução proposta. Comparativamente com a solução anterior, verificou-se que a redução da altura de onda a sotamar é menor. Também no que respeita a fenômenos de erosão, estes são maiores a meia distância entre os esporões devido à abertura existente entre os dois quebramares. No entanto, a solução de um sistema de dois quebramares tem influência numa área maior, sendo mais eficaz na proteção da zona mais a norte entre os esporões. Apesar disso, esta solução deveria ser otimizada, pois a redução nomeadamente da altura de onda e dos níveis de erosão a sotamar, aquando da implantação de ambos os quebramares destacados, não é satisfatória. Para uma otimização da solução, deveriam ser estudadas outras propostas, nomeadamente a alteração de alguns parâmetros funcionais como o comprimento e a orientação dos quebramares destacados, a distância à linha de costa e a distância entre estruturas.

Para todas as situações analisadas, em condições de agitação marítima de temporal, as consequências negativas junto à linha de costa são agravadas, ou seja, as alturas de onda são maiores e os fenómenos de erosão intensificam-se, como seria expectável. Por essa razão, em condições de temporal, é frequente a ocorrência de galgamentos da marginal e, por vezes, o recuo da linha de costa repentino. No entanto, a presença das estruturas destacadas faz com que estas consequências sejam minoradas.

O estudo feito posteriormente, relativo às alterações morfológicas ocorridas após duas semanas em condições de agitação médias, permitiu tirar importantes conclusões acerca das soluções propostas. Inicialmente analisada a situação de referência, observou-se que os fenómenos de erosão junto à linha de costa são evidentes. Com a presença de um quebramar destacado, as erosões diminuem a sotamar deste, sendo que ocorre um significativo nível de acreção que cria condições para uma possível formação de um tómbolo. No entanto, como era de prever, esta solução tem consequências negativas próximo da região a norte do esporão sul, existindo aí um ligeiro aumento das erosões ocorridas. No que se refere à solução de dois quebramares destacados, esta mantém praticamente as zonas de erosão já existentes, contudo o nível de erosão é menor. Em torno de ambas as estruturas, são observados fenómenos de acreção que poderão conduzir à formação de um tómbolo. Na extremidade norte das estruturas destacadas de ambas as situações, são visíveis importantes erosões que podem levar à ocorrência de infraescavações.

Em relação aos custos de construção, a solução de um quebramar seria mais vantajosa, pois o volume de obra é menor, enquanto que a solução de dois quebramares exigiria duas frentes de obra e maior volume de material. Quanto a uma possível estagnação das águas, esta é mais improvável de acontecer no caso do sistema de dois quebramares.

## 6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como já foi referido anteriormente, o *software* MIKE dispõe de uma inúmera gama de ferramentas e módulos que permitem ter em conta diversos parâmetros e estudar diferentes fatores. Devido a isso, ao fator tempo e ao facto de ser a primeira vez que este *software* é aplicado nesta faculdade, não existindo assim um termo de comparação, é possível que algumas das opções disponibilizadas não tenham sido utilizadas.

Como tal, sugere-se a aplicação de opções mais adequadas à definição de quebramares destacados. Como foi referido em capítulos anteriores, o quebramar destacado foi considerado como sendo uma fronteira sólida, ou seja, uma parede vertical de altura infinita, não sendo possível assim considerar alguns fenómenos importantes como é o caso dos galgamentos. Esta opção foi feita partindo do conhecimento inicial acerca do *software* e dos exemplos existentes de casos idênticos. No entanto, existe uma opção disponível no *software* mais complexa que permite a modelação de um quebramar como uma estrutura linear, onde se pode ter em conta a cota do coroamento, coeficientes de transmissão e coeficientes de reflexão.

Outra situação de grande interesse de estudo seria a alimentação artificial de areia para a criação de um tómbolo a sotamar do(s) quebramar(es) destacado(s). A modelação desta solução, utilizando o *software* MIKE, seria possível alterando os dados batimétricos na zona de alimentação e, assim, simular as alterações morfológicas, possibilitando o estudo dos fenómenos aí ocorridos. Contudo, no estudo da formação de tómbolos, é essencial o recurso à modelação física, tendo a consciência das limitações dos resultados da modelação numérica.

No que se refere aos parâmetros funcionais da(s) estrutura(s), nomeadamente comprimento longitudinal e orientação do quebramar destacado, largura de coroamento e distância à linha de costa, estes foram definidos segundo o conhecimento geral e exemplos práticos semelhantes. Posto isto, o dimensionamento hidráulico-estrutural seria fundamental na definição de todos estes parâmetros de uma forma muito mais rigorosa. Este dimensionamento deveria ser feito em consonância com a modelação numérica, complementando-se.

A modelação física é também uma ferramenta importantíssima na previsão de fenómenos que, muitas vezes, não são detetados na modelação numérica, pelo que é imprescindível aquando da conceção de estruturas de proteção costeira.

A análise do caso de estudo permitiu conhecer o histórico da zona em questão e verificou-se que a barlamar do esporão norte a linha de costa tem vindo a recuar e que são vulgares os galgamentos nessa zona, onde, para agravar a situação, existe uma elevada pressão urbana. As simulações efetuadas permitiram confirmar a grande exposição desta região. Por todas estas razões, este local requer especial atenção, nomeadamente no estudo futuro de possíveis intervenções de proteção costeira que possam mitigar os problemas aí ocorridos.

Por fim, poderiam ser testados diferentes características da agitação, no que se refere à altura, período e orientação de onda, e níveis de maré.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahrens, J. P. (2001). *Wave transmission over and through rubble-mound breakwaters*, Contract Report submitted to U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS.
- APA (2011). *Levantamento LiDAR 2011*. Agência Portuguesa do Ambiente, Portugal.
- Battjes, J.A. and J.P.F.M. (1978). *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*, in Proc. 16th Int. Conf. On Coastal Eng., ASCE, NY, 569-587.
- Black, K. and C.J. Andrews (2001). Sandy Shoreline Response to Offshore Obstacles, Part I: Salient and tombolo geometry and shape, Part II: Discussion of Formative Mechanisms, Journal of Coastal Research, Special Issue on Surfing.
- Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen (1999). *A third-generation wave model for coastal regions*. 1. Model description and validation. J. Geophys. Res., 104, 7649-7666.
- Briganti, R., J.W. van der Meer, M. Buccino and M. Calabrese (2003). *Wave transmission behind low crested structures*. Proc. Coastal Structures, Portland, Oregon, USA.
- Costa, G. (2011). *Modelação de Quebramares Destacados*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Costa, M., Silva, R. e Vitorino, J. (2001). *Contribuição para o Estudo do Clima de Agitação Marítima na Costa Portuguesa*. 2as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Sines, Portugal, 17-19 Outubro, 20 p. Associação Internacional de Navegação (publicação em CD).
- Dally, W.R. and J. Pope (1986). *Detached breakwaters for shore protection*, Technical report CERC-86-1, U.S. Army Engineer WES, Vicksburg, MS.
- DHI Software (2007). *MIKE Zero Preprocessing & Postprocessing*. 2007.
- Flather, R. A. (1976). *A tidal model of the northwest European continental shelf*. Memories de la Societe Royale des Sciences de Liege 6 (10), 141-164.
- González M., R. Medina (2001). On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. Coastal Engineering, 43, 209-225.
- Hanson, H. and Kraus, N.C. (1989). GENESIS: *Generalised model for simulating shoreline change*. Report 1: Technical Reference, Tech. Rep. CERC-89-19, US Army Engr., WES, Vicksburg, MS.
- Hanson, H. and Kraus, N.C. (1990). *Shoreline response to a single transmissive detached breakwater*, Proc. 22nd Coastal Engrg. Conf., ASCE, The Hague.
- Harris, M.M. and J.B. Herbich, (1986). *Effects of breakwater spacing on sand entrapment*, Journal of Hydraulic Research, 24 (5).
- Holthuijsen, L.H., N. Booij, and T.H.T Herbers (1989), *A prediction model for stationary, short crested waves in shallow water with ambient currents*. Coastal Eng., 13, 23-54.
- Holthuijsen L.H., Herman A., Booij N. and Cieslikiewicz W. (2002), *Diffraction in SWAN*, Proceedings 28th International Conference Coastal Engineering, Cardiff, 405-412.
- Hsu, J.R.C., e Evans, C. (1989). *Parabolic bay shapes and applications*. Proceedings Institution of Civil Engineers, Part 2. London: Thomas Telford, 87, pp. 557-570.
- Johnson, H.K. and H. Kofoed-Hansen (2000): *Influence of Bottom Friction on Sea Surface Roughness and Its Impact on Shallow Water Wind Wave Modelling*. J. Phys. Oceanogr., 30, 1743-1756.
- Komen, G.J., Cavaleri, L., Doneland, M., Hasselmann, K., Hasselmann S. and Janssen, P.A.E.M. (1994) *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge University Press, UK, 560pp.

- MIKE by DHI (2012). *MIKE Zero – Mesh Generator – Step-by-step training guide*. 2012, Horsholm, Dinamarca.
- MIKE by DHI (2013a). *MIKE 21 Wave Modelling. MIKE 21 SW – Spectral Waves FM. Short Description*. 2013, Horsholm, Dinamarca.
- MIKE by DHI (2013b). *MIKE 21 e MIKE 3 Flow Model FM. Sand Transport Module. Short Description*. 2013, Horsholm, Dinamarca.
- MIKE by DHI (2014). *MIKE 21/3 Coupled Model FM – Step-by-step training guide: Coastal application*. 2014, Horsholm, Dinamarca.
- Ming D. and Chiew Y-M. (2000). *Shoreline Changes behind Detached Breakwater*, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engng., Vol. 126, No.2, March/April.
- Piqueiro, F. (2015). *Fotografia aérea efetuada sobre a praia do Furadouro*. FEUP, Porto.
- Ramos, T. (2011). *Estudo da reabilitação de estruturas de defesa costeira – Casos de estudo do Mindelo, Norte do Furadouro e Torreira*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Silva, R., Baptista, P., Veloso-Gomes, F., Coelho, C. and Taveira-Pinto, F., (2009). *Sediment Grain Size variation on a coastal stretch facing the North Atlantic (NW Portugal)*. Journal of Coastal Research, SI 56 (Proceedings of the 10th International Coastal Symposium). Lisbon, Portugal, ISBN.
- Smagorinsky (1963), J. *General Circulation Experiment with the Primitive Equations*, Monthly Weather Review, 91, No. 3, pp 99-164.
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands: a manual for practical applications*. Thomas Telford.
- Taveira Pinto, F. (2007). *Análise da Concepção e Dimensionamento Hidráulico-Estrutural de Quebramares Destacados*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Taveira Pinto, F. (2001). *Análise das oscilações e dos campos de velocidades nas proximidades de quebramares submersos sob a acção da agitação marítima*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Van der Meer, J.W. and Daemen, I.F.R. (1994) *Stability and wave transmission at low-crested rubble mound structures*, ASCE, J. of Waterways, Port, Coast and Ocean Eng. WW1.
- Veloso Gomes, F. (2010). *Contributos para a revisão do plano de ordenamento da orla costeira na região centro*. 5<sup>as</sup> Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente. FEUP, Porto.
- Veloso Gomes, F. (2014a) *A Engenharia Portuguesa em revista*. INGENIUM, II Série, Número 141, Maio-Junho/2014, Ordem dos Engenheiros.
- Veloso Gomes, F. (2014b). *Quebramares*. Trabalhos Marítimos 1. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Veloso Gomes, F. (2014c). *Fenómenos de interação com fronteiras sólidas*. Trabalhos Marítimos 1. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Young, I.R. (1999): *Wind generated ocean waves*, in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick, Elsevier.
- <https://earth.google.com>. Maio/Junho de 2015.
- <http://pt.windfinder.com/forecast/furadouro>. Abril de 2015.
- <http://www.coastalpractice.net/glossary/diffraction.htm>. Junho de 2015.

[http://www.coastalwiki.org/wiki/detached\\_breakwaters](http://www.coastalwiki.org/wiki/detached_breakwaters). Junho de 2015.

<http://www.mikepoweredbydhi.com>. Maio/Junho de 2015.